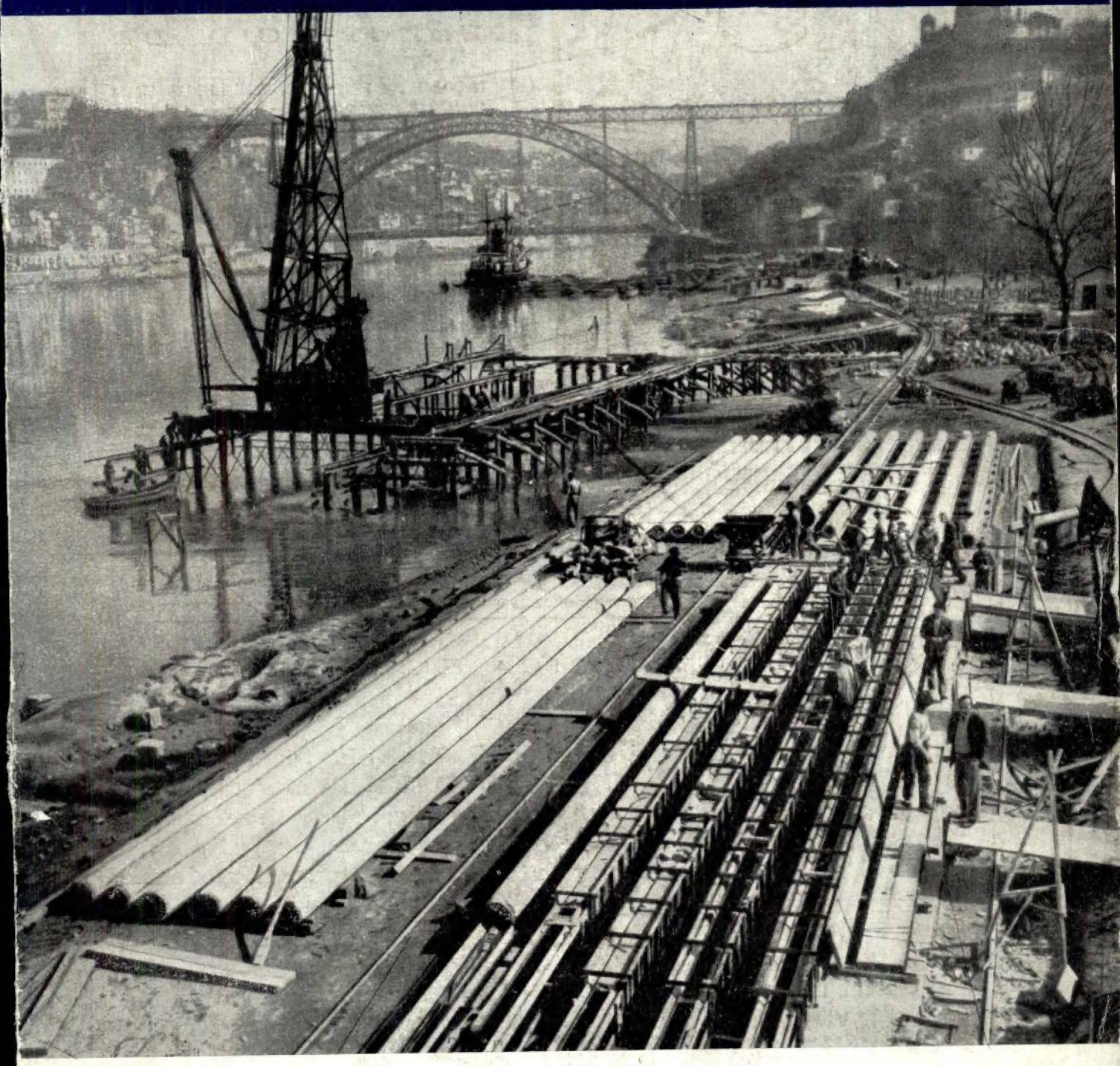
TÉCNICA



REVISTA DE ENGENHARIA
DOS ALUNOS DO I. S. T.

N.º 247-DEZEMBRO-1954

CIMENTO SECIL

O CIMENTO PARA OBRAS DE GRANDE RESPONSABILIDADE

4 fornos rotativos — 300.000 toneladas anuais

Fábrica no Outão — Setúbal

Lisboa — Rua do Comércio, 56-3.º

Desde o Distrito de **VIANA DO CASTELO** ao de **LEIRIA** e nos Distritos de **SETÚBAL** e **ÉVORA** as

FÁBRICAS
CIDADES
VILAS e
ALDEIAS portuguesas

são abastecidas de

ELECTRICIDADE

para

FORÇA MOTRIZ E TODOS OS USOS INDUSTRIAIS, LUZ, ETC., a TARIFAS MUITO VANTAJOSAS e com as **maiores facilidades**,

pela

UNIÃO ELECTRICA PORTUGUESA

e produzidas nas CENTRAIS:

Thérmica do FREIXO .... 22.000 CV
Hidráulica do LINDOSO... .. ... 100.000 CV
Thérmica da CACHOFARRA... 14.000 CV

Os Escritórios da UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA são:

NO PORTO Rua Duque de Loulé, 240
EM LISBOA R. António Maria Cardoso, 13, 2.º

CIMENTO TEJO

FÁBRICA EM ALHANDRA

A instalação mais moderna do País. Dois fornos rotativos em laboração. — O "CIMENTO TEJO" marca pelas suas altas resistências e regularidade, garantidas pela fiscalização contínua de todas as fases do fabrico, exercida por técnicos portugueses especializados.

Pedidos à Companhia "CIMENTO TEJO"

SEDE EM LISBOA
RUA DA VITÓRIA, 88, 2.º

FILIAL NO NORTE
AV. DOS ALIADOS, 20, 3.º
PORTO

TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA DOS ALUNOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Ano XXIX - N.º 247 Dezembro de 1954

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * LISBOA-N. * TELEF. 77 0144 (Linha 50)

DIRECTOR

FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA

ADMINISTRADORES

VIRGÍLIO CARDOSO IGREJA

JOSÉ DO SACRAMENTO COSTA

SECRETÁRIO

JORGE DO NASCIMENTO VALÉRIO

CORPO REDACTORIAL

ADELINO JOSÉ SOARES DE MELO

JOÃO PEDRO MOTA E MELO

MANUEL M. FRIAS DE ALMEIDA E SÁ

VÍRGÍLIO LOPES CABRITA

*

NUMERO AVULSO 12$50

ASSINATURAS:

	3 N.os	5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	32$50	50$00	95$00
Ultramar Português e Estrangeiro	—	55$00	100$00

*

EDITOR E PROPRIETÁRIO

ASS. DOS ESTUD. DO I.S.T.

*

COMPOSTO E IMPRESSO NA

Tip. JORGE FERNANDES, L.da

RUA CRUZ DOS POIAIS, 103

LISBOA

SUMÁRIO

CAPA — Obras do muro-cais de Vila Nova de Gaia sobre estacas cravadas de betão armado com o comprimento médio de 22 metros. — Construção da SOMEC.

Págs

As limitações pedagógicas no ensino da engenharia química
Pelo Eng.º Quím.-Ind. Luís A. de Almeida Alves 121

A química analítica e a indústria
Pelo Eng.º Quím.-Ind. A. Herculano de Carvalho 127

Alguns aspectos do transporte sólido em problemas hidráulicos
Pelo Eng.º Civil (I. S. T.) Armando Lencastre 133

Funções termodinâmicas
Pelo Eng.º Quím.-Ind. (I. S. T.) António Sales Luís 153

Notas informativas — **Elementos sobre a produção e consumo de energia na rede eléctrica nacional** 159

Apontamentos sobre a equilibragem dinâmica das máquinas rotativas
Por F. Fanchamps 161

Vida Escolar e Associativa — I Semana de Química, dedicada ao curso de Engenharia Químico-Industrial pela A. E. I. S. T., com a colaboração da Indústria Química Portuguesa
Por António de Mello Coelho 177

Do Mundo Técnico 181

Biblioteca 185

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

Índice Alfabético dos nossos anunciantes

A

Pág.

Agência Geral de Material Eléctrico, Ltd.ª . . . . . XIII, XXIII
A. Gestetner, Ltd.ª XL
Ahlers, Lindley, Ltd.ª XX
António Baró XLI
Azevedo & Pessi, Ltd.ª XLI

B

Bethlehem Steel XXIX
Blackwood Hodge IX
Bouhon & Irmão, Ltd.ª XLI

C

Canelas & Figueiredo, Ltd.ª XXII
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Companhia «Cimento Tejo» . . . . . 2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos . . II
Companhia União Fabril XXXIX
Construções Técnicas, Ltd.ª II
C. Santos, Ltd.ª . . . . . XXXI, XXXV

E

Edouard Dalphin . . . . . 4.ª da capa
Electro-Arco, Ltd.ª XXXIX
Emílio de Azevedo Campos & C.ª, Ltd.ª . . . . . XXX, XXXVIII
Empresa de Cimentos de Leiria . . . IV
Empresa Electro Cerâmica XXXIV
Empresa de Produtos Asfálticos . . . VIII
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa

F

Fábrica Metalúrgica e Construtora CARAVELA, Ltd.ª XXVIII
Fábrica Portugal XXXVI
Fundição e Construção Mecânicas VI

G

General Electric Portuguesa XXI

H

Henriques & Castro, Ltd.ª XXXVIII

I

INEL XIX
IST XXV

J

J. E. Michaëlis de Vasconcellos (Eng.º) XVI

J

Pág.

J. J. Gonçalves, Sucrs. XL

L

Leacock (Lisboa), Ltd.ª XI

M

Manil XXX
Máquinas de Precisão, Ltd.ª XXXIV
Martin, Leslie & C.ª Ltd. X
Monteiro Gomes, Ltd.ª . . . . . V, XXXIII

N

Nordberg XVII

P

P. Bellasi XII
Pestana & Fernandes, Ltd.ª X

S

Senna, Botto & Leitão, Ltd.ª XXVII
SKF XVI
SMEIA . . . . . III, XXXII
Sociedade Comercial Crocker Delaforce & C.ª XXVI
Sociedade Construtora Portuguesa, Ltd.ª II
Sociedade Ericsson de Portugal, Ltd.ª XLII
Sociedade Industrial Metalúrgica . XL
Sociedade dos Mármores de Portugal, Ltd.ª XXXIX
Sociedade Portuguesa Cavan VIII
Sociedade Portuguesa do Acumulador Tudor XVII
Socony-Vacuum Portuguesa . . . .
SOFAI, Ltd.ª XXXVII
SOMEC VI
Sondagens Ródio, Ltd.ª X
SOPECATE XXXIX
Standard Eléctrica VII

T

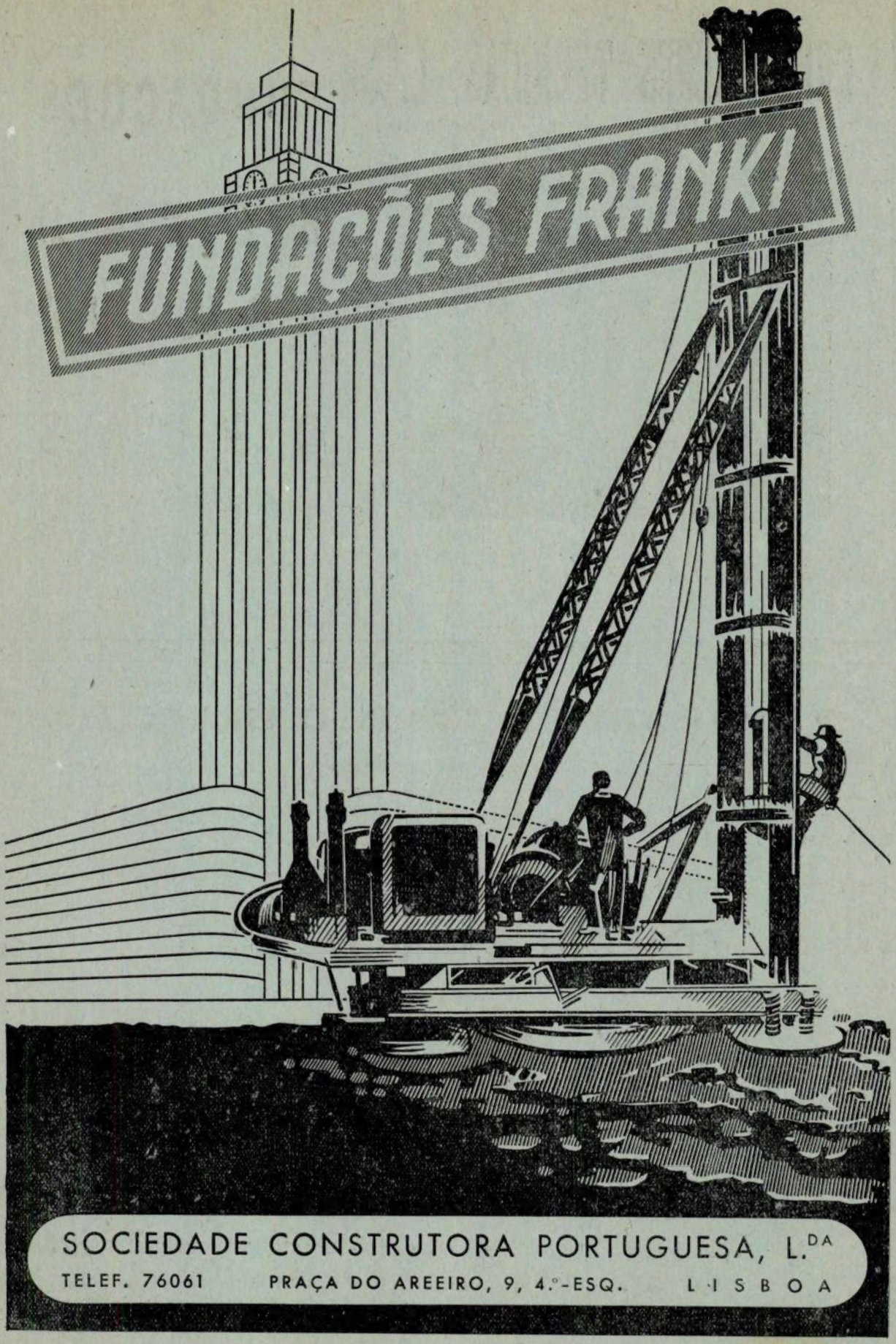
Technoimpex . . . . . XIV, XV, XXIV

U

União Eléctrica Portuguesa . . . . . 2.ª da capa

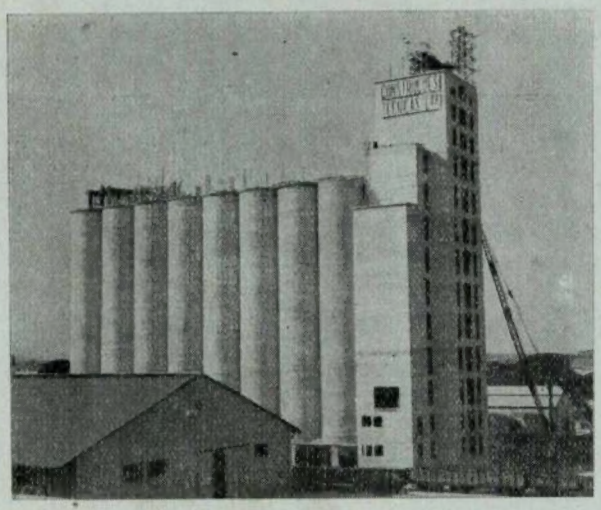
V

V. T. Martins IV


FUNDAÇÕES FRANKI
SOCIEDADE CONSTRUTORA PORTUGUESA, L.DA
TELEF. 76061
PRAÇA DO AREEIRO, 9, 4.º-ESQ.
LISBOA

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, L.DA

Praça do Município, 13, 3.º — LISBOA — Telefone 2 2344



Silo de betão armado, para 20.000 ton. de milho, construído no Porto do Lobito, com moldes deslizantes sistema «PROMETO»

FUNDAÇÕES

BETÃO ARMADO

OBRAS PÚBLICAS

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 2 0464 — Lisboa

No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

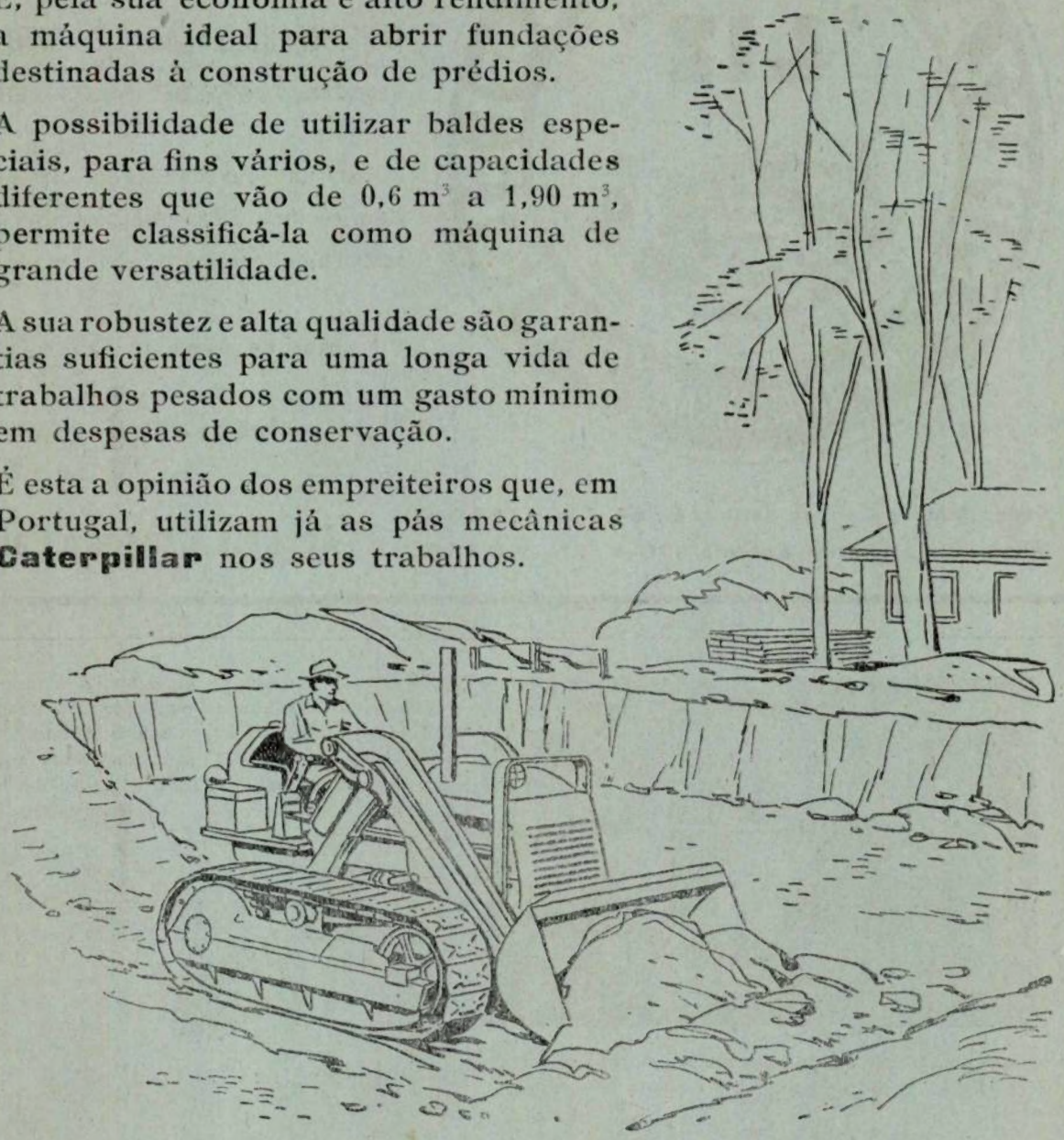
A pá mecânica **CATERPILLAR** HT4 escava e carrega terra e pedras, podendo trabalhar, também, como bulldozer.

É, pela sua economia e alto rendimento, a máquina ideal para abrir fundações destinadas à construção de prédios.

A possibilidade de utilizar baldes especiais, para fins vários, e de capacidades diferentes que vão de 0,6 m^3 a 1,90 m^3, permite classificá-la como máquina de grande versatilidade.

A sua robustez e alta qualidade são garantias suficientes para uma longa vida de trabalhos pesados com um gasto mínimo em despesas de conservação.

É esta a opinião dos empreiteiros que, em Portugal, utilizam já as pás mecânicas **Caterpillar** nos seus trabalhos.



CATERPILLAR

MARCA REGISTADA

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

SMEIA

SOCIEDADE DE MECANIZAÇÃO INDUSTRIAL E AGRÍCOLA. S. A. R. L.

Avenida Padre Manuel da Nóbrega, 8 LISBOA

Cimento «Liz» hidrofugado «N»

PRÓPRIO PARA

IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS

REBOCOS, FUNDAÇÕES, PAREDES, ETC.

Substitue com vantagem de ordem técnica e económica todos os impermeabilizadores conhecidos.

Em sacos de papel de 50 quilos

Peçam instruções para o seu emprêgo

Sede: Rua do Cais de Santarém, 64, 1.º — LISBOA
Filial: Rua de Santo António, 190-A, 1.º — PORTO

Agentes em todo o País

Uma construção a cargo dos nossos antigos clientes "OPCA" — Obras Públicas e Cimento Armado, L.ª

Rua Arco Carvalhão, 302

LISBOA

A Impermeabilização de todas as coberturas e placas das magníficas instalações do novo Matadouro-Frigorífico da Câmara Municipal de Lisboa nos Olivais foram confiados aos serviços técnicos da firma WILLIAM BRIGGS & SONS, L.ª, aplicando os seus famosos produtos

já sobejamente conhecidos dos técnicos da construção.

30 anos ao serviço da construção em Portugal

Confiar os vossos trabalhos de impermeabilização aos nossos serviços é ter a certeza que sereis bem servidos.

Peçam orçamentos grátis aos distribuidores:

No Centro e Sul:

V. T. MARTINS
R. da Prata, 59, 3.º-Esq.
Telef. 23690 LISBOA

No Norte:

BLACKETT & C.ª, L.ª
R. da Nova Alfândega, 22
Telef. 21407 PORTO

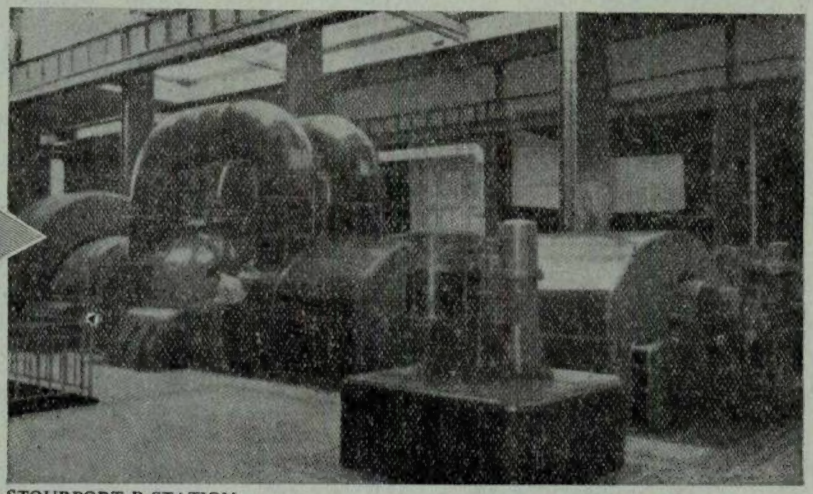
'ENGLISH ELECTRIC'

CENTRAIS TÉRMICAS A VAPOR

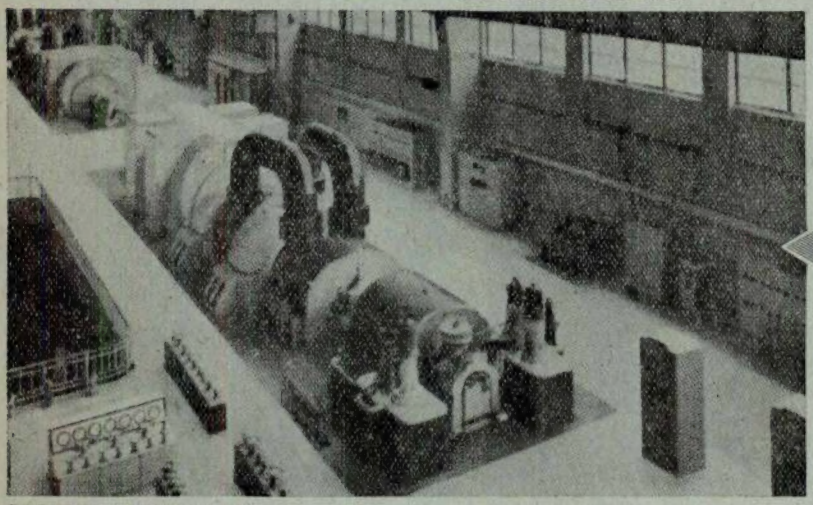
Os maiores rendimentos obtidos durante o ano de 1953 em centrais termicas nas Ilhas Britânicas foram de 30,4 % e 29,1 %, respectivamente nas centrais de Stourport B e Bromborough. Os grupos instalados em Stourport B são de 60 MW, com vapor a 88 kg/cm² e 510° C.

Os grupos instalados em Bromborough são de 50 MW, com vapor a 68,5 kg/cm² e 483° C.

30·4%



STOURPORT B STATION



29·1%

BROMBOROUGH STATION

Representantes exclusivos para Portugal e África Ocidental Portuguesa:

MONTEIRO GOMES, LIMITADA

Ru Cascais, 47 (Alcântara) — LISBOA e Praça do Município, 309, 3.° — PORTO

Telefone 3 7083 **Telefone 2 5021**

E

BEJA VILA FRANCA DE XIRA LUANDA

FUNDIÇÃO E CONSTRUÇÃO MECÂNICAS

S. A. R. L.

OEIRAS

Uma grande organização na «Indústria Metalúrgica e Metalomecânica nacional»

Com **Fábrica** onde se produz:

Fundição de ferro, Ferros Ligas e Metais, Esmaltes — Esmaltagem

OFICINAS DE SERRALHARIA E FORJAS

Alguns artigos de série:

Banheiras de ferro fundido esmaltado — Todos os artigos sanitários para casa de banho e cozinha — Caldeiras e radiadores para aquecimento central — Salamandras — Fogões e fogareiros a gás — Fogões a lenha e carvão — Escadas e escadotes — Tábuas de engomar — Material para construção civil (aros para claraboias, sifões de pátio, ventiladores, portinholas, olhos de boi, autoclismos, etc.) — Bancos de jardim — Candeeiros para iluminação pública, etc.

PROJECTOS, ORÇAMENTOS E EXECUÇÃO DE INSTALAÇÕES E AQUECIMENTO CENTRAL

Vendas directas ao comércio da especialidade

Telef. Oeiras { P. P. C. 324 — 4 linhas / Administ. 156

Teleg. Fundição — OEIRAS

Correio: Apartado 711
LISBOA — CENTRAL

SECÇÃO DE AQUECIMENTO

Av. António Augusto de Aguiar, 7-A

Telefone 4 1110

Sociedade Metropolitana e Colonial de Construções, L.da

SOMEC

R. da Madalena, 163 — Lisboa Telefone 32795/6

Sondagens

Fundações

Betão armado

Trabalhos marítimos

Túneis

no Continente e Ultramar

Standard Electrica

ASSOCIADA

DA

"INTERNATIONAL TELEPHONE & TELEGRAPH CORPORATION"

PROJECTOS — FORNECIMENTOS — INSTALAÇÕES

— Material de radiocomunicações para todas as aplicações em média, alta, muito alta e ultra-alta frequência;

— Equipamentos de radiodifusão e televisão e respectivo material de estúdio e acessórios;

— Sistemas de antenas para aplicações gerais e especiais para radiocomunicações, radiodifusão e televisão;

— Instalações de comutação telefónica, manuais e automáticas, de todos os sistemas e capacidades. Sistemas de comunicações por fios em altas frequências;

— Materiais de transmissão telegráfica automática, por fios e por rádio;

— Sistemas de sinalização e de comando, automáticos e manuais, intercomunicadores, amplificadores e aparelhagem acessória;

— Cabos e acessórios de todos os tipos, para energia, comunicações e altas frequências;

— Rectificadores de selénio de tipos especiais e gerais para todas as aplicações.

Serviços Técnicos, Comerciais e Fábrica

NA AVENIDA DA INDIA — LISBOA

TEL. 38171/6

telefones · radio · cabos

Para impermeabilizar terraços, paredes, fundações, etc.

CONTRA A HUMIDADE

FABRICA EM SACAVÉM

TELEFONES { 4 2651 / 4 2156 TELEG. EPALDA—LISBOA

CAVAN

SOCIEDADE PORTUGUESA

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

RUA D. ESTEFÂNIA, 42
TELEF. 47812-50129
LISBOA

para a construção da Barragem de Paradela

20 camiões basculantes EUCLID para 20 tons. de carga útil, com poderosos motores Diesel, de 250 C. V., serão utilizados pela Sociedade de Empreitadas de Obras Públicas, Ltd.ª, no transporte dos 6 milhões de toneladas de rocha que irão constituir a Barragem de Paradela,

a maior Barragem de enrocamento do Mundo.

É a 11.ª Barragem a construir em Portugal nos últimos anos. É a 11.ª Barragem em cuja construção os EUCLIDS desempenham papel de relevo!

BLACKWOOD HODGE

Companhias Associadas, Filiais, Oficinas *e Agências em todo o Mundo.*

Temos a honra de anunciar

A NOSSA NOMEAÇÃO, COMO AGENTES EXCLUSIVOS PARA PORTUGAL E PROVINCIAS ULTRAMARINAS, PELA FIRMA:

Crofts (ENGINEERS), LTD.
BRADFORD – INGLATERRA

universalmente conhecida como especialista em:

TRANSMISSÕES POR CORREIA, CABO E ENGRENAGENS para todas as indústrias e potências FUNDIÇÃO DE AÇO OU LATÃO — FABRICAÇÃO DE CONSTRUÇÕES DE SECÇÕES METÁLICAS

- TRANSMISSÕES POR TAMBORES DE CORREIAS TRAPEZOIDAIS, DE VELOCIDADE FIXA OU VARIAVEL
- ENGRENAGENS DE VELOCIDADE VARIAVEL OU DE REDUÇÃO COM PARAFUSO SEM-FIM
- EMBRAIAGENS DE FRICÇÃO OU DISCO SIMPLES OU MULTIPLO
- EMBRAIAGENS «AIRFLEX»
- CAIXAS DE ENGRENAGEM CONICAS — MODELO «RADIATION» OU A OLEO, DE VELOCIDADE VARIAVEL, TIPO «CARTER»
- UNIDADES «C-JR» PARA COMANDO DE VARIAÇOES DE VELOCIDADE
- UNIOES FLEXIVEIS
- MANGAS CONICAS FENDIDAS
- MOTORES PARA ENGRENAGENS «EFFICIENCY», ETC., ETC.

O ramo da n/ Representada é TRANSMISSÃO DE ENERGIA. Fornece máquinas de todas as potências, tanto para produzir como para utilizar energia eléctrica, e está preparada para atender qualquer indústria

A APARELHAGEM CROFT É HOJE UTILIZADA EM QUASE TODOS OS PAÍSES DO MUNDO
QUEIRAM DIRIGIR-NOS AS VOSSAS CONSULTAS

MARTIN LESLIE & C.ª, LDA.
CAMPO DAS CEBOLAS, 43-3.º D.—TELEFONES 32824 E 35234—LISBOA

A nossa Representada dispõe de grande variedade de material em armazém em Inglaterra para ENTREGA IMEDIATA ou a curto prazo

use Tesakrepp...

...PARA FIXAR O PAPEL DE DESENHO NA SUA PRANCHETA

TESAKREPP fita adesiva em papel especial, manterá em perfeito estado de conservação a sua prancheta e o seu desenho.

A mesma tira pode aplicar-se várias vezes

Tesa

BEIERSDORF-HAMBURGO
REPRESENTANTE
PESTANA & FERNANDES
RUA DA PRATA, 153, 2.º — LISBOA
TELEFONE 24261

S.A.P.

SONDAGENS RÓDIO, L.DA
LISBOA
RUA S. MAMEDE AO CALDAS, 22, 3.º
Telefones: 28685 - 26865 ✦ Telegramas: SETANSOL

RODIO

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

—//—

Sócio gerente: **Walter Weyermann**–Eng. civil

LEACOCK (LISBOA), L.DA

AV. 24 DE JULHO, 16 — LISBOA

R. JOSÉ FALCÃO, 185 — PORTO

SECÇÃO DE MÁQUINAS E ELECTRICIDADE

REPRESENTANTES DE:

THE RAWLPLUG COMPANY, LTD.
Material de fixação para construção civil e mecânica.

HOOVER, LTD.
Motores eléctricos desde 1/8 até 3/4 H. P., Monofásicos e Trifásicos.

VERITYS, LTD.
Motores eléctricos desde 1 até 125 H. P

J. A. CRABTREE & CO. LTD.
Material para instalações de luz: interruptores, fichas, tomadas, etc.
Material para instalações de força: arrancadores, disjuntores, caixas, etc.

TRANSFORMERS & WELDERS, LTD.
Transformadores de todos os tipos até à potência de 3000 K. V. A. e até à tensão de 33000 Volts.

BARTON CONDUITS, LTD.
Tubo de aço para instalações eléctricas.

EDWARD MAC BEAN & CO. LTD.
Tubo, fita e pano de tela envernizada.

MEASURING INSTRUMENTS (PULLIN), LTD.
Amperímetros, Voltímetros, Frequencímetros, Wattímetros de todos os tipos e escalas.

F. PERKINS, LTD.
Motores Diesel marítimos.

THE AUTOMATIC COIL WINDER AND ELECTRICAL EQUIPMENT CO, LTD.
Osciladores, capacímetros, texts universais, texts electrónicos, analisadores de válvulas, luxímetros, expositores para fotografias.
Máquinas para bobinar e enfitar.

GEORGE KENT
Contadores de água, de vapor e de óleo.
Tubos Venturi
Determinadores e controladores do pH, do CO_2 e pirómetros pelo processo potenciométrico.
Combustiómetros, manómetros, registadores de distâncias, medidores-registadores de caudais, medidores de orifícios em condutas para gases.

THORN ELECTRICAL INDUSTRIES, LTD.
Luz fluorescente e rádios.

ELECTRIC PANELS, LTD.
Aquecimento eléctrico.

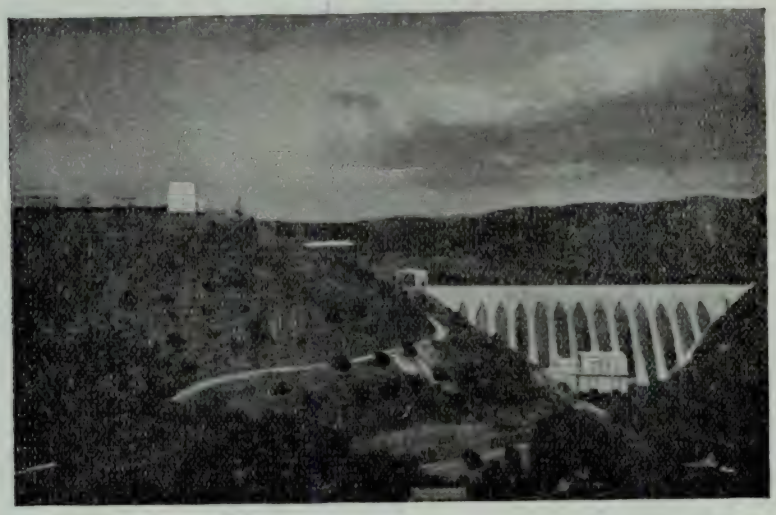
OERLIKON

Máquinas e aparelhos eléctricos de todo o género

REPRESENTANTE GERAL PARA PORTUGAL E ULTRAMAR

P. BELLASI

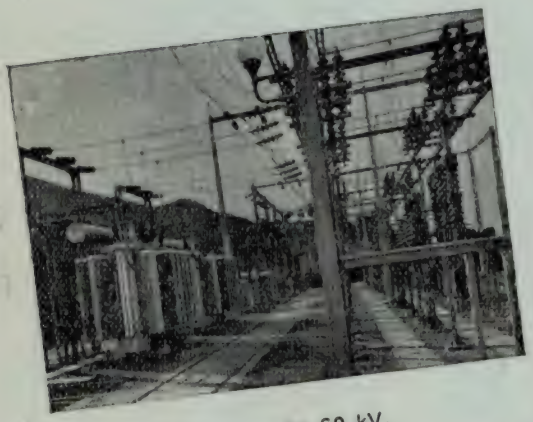
PORTO — Rua Sá da Bandeira, 494-3.° — Telefone 21968



Vista geral da BARRAGEM DE PRACANA

da

HIDRO-ELÉCTRICA ALTO ALENTEJO



Subestação 60 kV.

Sala das máquinas da Central

Potência instalada
2 x 10.500 CV

Equipamento eléctrico fornecido e instalado
pelos

ATELIERS DE CONSTRUCTION OERLIKON

ZURICH-OERLIKON (SUIÇA)

TÉCNICA

DIRECTOR — FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA ADMINISTRADORES { VIRGÍLIO DOS REIS CARDOSO IGREJA / JOSÉ DO SACRAMENTO COSTA

CORPO REDACTORIAL — ADELINO JOSÉ SOARES DE MELO, AFONSO MANUEL BRAGA DA CRUZ, JOÃO PEDRO MOTA E MELO MANUEL M. FRIAS DE ALMEIDA E SÁ E VIRGÍLIO LOPES CABRITA

Ano XXIX - N.º 247 Dezembro de 1954

C. D. 66 : 378.1

AS LIMITAÇÕES PEDAGÓGICAS NO ENSINO DA ENGENHARIA QUÍMICA

PELO ENG.º QUÍMICO-INDUSTRIAL LUÍS A. DE ALMEIDA ALVES
Prof. do I. S. T.

Conferência proferida na sessão solene de abertura da I Semana de Química

Por uma circunstância meramente acidental, acabei por ter de fazer a conferência da sessão de hoje, que inaugura a I Semana de Química do Instituto Superior Técnico. E isso, embora se tenha reflectido, de uma maneira não pouco sensível, no tempo disponível para a preparar, teve talvez a vantagem de permitir enquadrar melhor o tema escolhido, dentro do espírito que norteou e definiu as linhas gerais desta exposição.

Pode parecer à primeira vista, excessivamente solene falar no «espírito» que preside a uma realização que, em si, não tem nada de transcendente e que, pela sua própria natureza, tem um carácter de certo modo circunscrito. Não se trata, com efeito, duma representação em larga escala, da Indústria no plano nacional, sem carência de recursos e sem dificuldades de organização; trata-se, pelo contrário, apenas do resultado de um certo sentido «pré-profissional» dos alunos que começam a «viver» a finalidade do curso; e, por outro lado, de um sentimento de confiança no progresso com que algumas empresas — aliás as mais importantes do País — quizeram estimular o cuidado da preparação técnica das novas gerações.

No fundo, estas duas origens ultrapassam os limites das preocupações escolares ou dos interesses comerciais e representam já um certo idealismo em face da vida profissional e dos objectivos industriais imediatos. Idealismo que não é absolutamente desinteressado, porque se o fosse, estaria em contradição com a própria essência do conceito de Engenharia.

Não há incompatibilidade de termos quando se procura um carácter de idealismo, numa actividade estruturalmente materialista, cuja finalidade primária é «produzir barato» e «ganhar dinheiro». E não há, porque os conceitos de «idealismo» e de «materialismo» são conceitos intrínsecos, independentes dos sistemas de referência; por outras palavras, exprimem apenas uma atitude, em face da realidade da vida.

A profissão em si própria é uma forma de utilidade; a Indústria, acima de tudo, representa um valor social. E as perspectivas destas duas noções têm um ponto de fuga comum, concretizado nos objectivos finais de *valorização económica* e de *valorização profissional*.

Se atentarmos bem no significado destes objectivos, talvez possamos compreender desde já o «espírito» desta Semana de Química, porque é precisamente através deles que se estabelece o elo de

ligação entre dois níveis ainda sem interligações funcionais, mas cujos campos de forças começam a ter entre si, as primeiras relações de contiguidade.

Na evolução psicológica do aluno de um curso superior de Engenharia, é natural que a par da sua formação, eivada de princípios, de fórmulas e de dados empíricos, surja a necessidade íntima de ver «resultados»; e mais, de confirmar se esses resultados representam realmente, os fins atingíveis por intermédio dessa formação. E se essa visão nem sempre é clara — e pela simples razão de que nem sempre o pode ser — há pelo menos um princípio, que é sempre confirmado — e esse princípio é o da valorização económica máxima.

Mas há que notar que um quadro de valorização económica não é um dado estático que se mantenha inalterado através dos tempos, porque é sempre uma função de duas variáveis fundamentais:

— O empobrecimento progressivo das matérias-primas naturais

— A evolução contínua dos processos de tratamento

Estas duas variáveis não podem ser consideradas como independentes porque o aproveitamento económico de matérias mais pobres implica normalmente técnicas mais complicadas e por isso, em última análise, a valorização económica é em cada instante, um reflexo fiel do correspondente progresso da Técnica, ou se quisermos, da evolução progressiva das técnicas especializadas.

Técnicas especializadas significam *especialização* e esta transcende evidentemente as possibilidades da Escola.

Por este motivo, a confirmação do princípio da valorização económica máxima não constitui só por si, um índice directo da potencialidade de um curso em relação à vida industrial; para que esta potencialidade se demonstre, é necessário que, independentemente dos processos, se «sinta» que a aparelhagem industrial — cuja unidade de valor é, pelo menos, o milhar de contos — corresponde à exploração económica de valor mínimo. E nessas condições, talvez surja como evidente, a utilidade directa da formação, como meio de «dissecção» dessa aparelhagem, dominando-a no pormenor do projecto e na eficiência do funcionamento.

Por esta razão, o contacto com as grandes realizações industriais pode constituir o grande índice de confiança nos resultados da preparação, desde que se admita, por hipótese, que os cursos são orientados no sentido mais conveniente.

Do ponto de vista das empresas, a divulgação da grandeza dos seus empreendimentos, representa uma espécie de «mostruário» das riquezas que é necessário saber explorar e fazer progredir, contando para isso, com o nível técnico dos seus quadros, cujo sentido de orientação começa a ser esboçado nas escolas que os preparam.

Deste conjunto de considerações, resulta que na sua essência, esta Semana de Química constitui uma forma de contacto entre a Indústria e a Escola, sem convencionalismos nem constrangimentos e com uma finalidade utilitária em qualquer dos sentidos que se considere. Finalidade que está vinculada a um espírito mais amplo de valorização mútua — económica e profissional — e por isso mesmo, plenamente integrada nos ideais da Engenharia, como factor social, dentro do panorama geral da vida do País.

De tudo isto, ressalta que a iniciativa do curso de Química do Instituto — do mesmo modo que realizações semelhantes que outros cursos têm levado a efeito — teve o grande mérito de querer interessar a Indústria nos seus problemas de formação; e por isso a Escola, como entidade responsável pela orientação desses problemas, não pode deixar de dar o seu concurso, fazendo intervir os factores de ordem pedagógica, nos quais se baseia a «técnica» dessa formação.

Nas suas linhas gerais, o problema pode pôr-se nos seguintes termos: Até que ponto é a Escola capaz de dar a preparação que a Indústria requere? Ou por outras palavras mais precisas: Quais as limitações do ensino em face dos melhores resultados a atingir?

Comecemos por citar uma história muito pitoresca que se conta a propósito de «Educação Técnica» num artigo que foi publicado, há relativamente pouco tempo ([1]).

([1]) Charles O. Brown, «Industrial and Engineering Chemistry», Dezembro de 1953.

Tratava-se de montar um grande gerador numa nova central, num local situado abaixo do nível do chão, dentro de um poço com três metros de profundidade. Devido a um erro de projecto, não se previu a montagem de um guincho para a colocação do gerador — que pesava algumas toneladas — nem o edifício tinha altura suficiente para essa montagem.

Estudado o problema pelos engenheiros responsáveis, resolveu-se abrir um buraco no teto para montar o guincho, solução que custaria uma dezena de contos e que atrazaria a montagem pelo menos, de uma semana.

Nessa altura, uma pessoa habituada a resolver problemas de emergência, sugeriu uma solução muito mais barata e que resolveria o problema apenas em quatro horas.

A solução consistia simplesmente no seguinte: Compravam-se algumas toneladas de gelo que se amontoavam dentro do poço até atingir o nível do chão. Depois, arrastava-se fàcilmente o gerador até ao nível dessa coluna de gelo a qual se fundia a seguir progressivamente por meio de uma mangueira de vapor de modo a fazer baixar o gerador de uma maneira suave até ao fundo do poço.

Esta solução é na aparência muito atraente, mas enferma de alguns pequenos erros que a invalidam totalmente e os quais o autor se entretem a analizar na parte restante do artigo.

Em primeiro lugar, o enchimento do poço com blocos de gelo é uma operação quase impossível, em particular no que se refere à obtenção de uma superfície lisa na parte superior.

Em segundo lugar, o arrastamento até essa superfície, teria de se fazer sobre rolos, os quais não suportariam rigorosamente a mesma pressão e começariam a fundir o gelo — de acordo com a 1.ª fórmula de Clapeyron — mas de maneira irregular e de tal modo que se criariam esforços laterais que provocariam um escorregamento de encontro às paredes.

Em terceiro lugar, o gerador acabaria por ficar debaixo de água, a não ser que esta conseguisse ser retirada à medida que se formava, o que seria relativamente difícil sem desferrar a bomba de momento a momento.

Em quarto lugar, mesmo que o gerador não escorregasse lateralmente, seria muito pouco provável que a furação da base ficasse perfeitamente alinhada com os parafusos da fundação e se não ficasse, não seria possível corrigir a sua posição.

E em quinto lugar, finalmente, não se poderia esperar que o enrolamento do gerador ficasse insensível à humidade do banho de água e vapor com que ficaria em contacto durante essa «suave descida».

E como remate do aspecto anedótico da questão o autor continua do seguinte modo:

«Eu considero que uma educação intensa no campo da Engenharia é de tal maneira importante, que julgo devermos dar o mais sincero apoio a todos aqueles que frequentam cursos de aperfeiçoamento para aumentarem a sua cultura técnica. Isso não só ajuda, como também paga. Esses engenheiros de elevada preparação conseguem chegar a soluções expeditas tão fàcilmente como o «prático» da história, mas com a diferença de que são soluções de elevado nível técnico e não apenas improvisações de momento.»

Esta história introduz o problema de uma maneira simples e não tem a pretensão de lhe procurar uma solução a não ser um aspecto qualitativo muito genérico. Fica de pé portanto, a pergunta inicial, que vou retomar neste momento, circunscrevendo-a no entanto, ao caso da Engenharia Química, para chegar finalmente ao título do tema a tratar.

Se fosse possível reduzir um problema desta índole a termos simplistas não se andaria muito longe da verdade se se afirmasse que Engenharia Química é Termodinâmica Aplicada. Talvez um pouco mais do que isso, porque não se compreende qualquer ramo de Engenharia sem uma formação básica de Mecânica e de Resistência; mas em todo o caso, Termodinâmica principalmente.

Esta síntese está muito longe de ser forçada porque os dois grandes pilares da Engenharia Química — a Mecânica Quimica e a Tecnologia — não são mais do que Termodinâmica orientada quer no sentido do estudo físico-químico das reacções, quer no sentido da interpretação dos movi-

mentos de massas ou de calor. E por isso mesmo, não implica em si própria, nenhuma limitação.

As limitações que podem surgir são de duas origens:

— Extensão a dar à preparação teórica

— Equilíbrio entre a preparação teórica e a experiência de carácter prático.

Chegados a este ponto, não resisto à tentação de citar mais uma vez, uma passagem do «Chemical Engineering Progress» de há dois anos ([1]) e que é a seguinte:

«O que interessa é a capacidade não só de definir os problemas, mas também de os resolver. Esta capacidade conjunta é geralmente o resultado de construir uma experiência industrial realizadora sobre uma fundação sólida de conhecimentos científicos. Esta última é adquirida com vantagem na Escola. A experiência industrial só pode ser adquirida na Indústria.»

No meu entender, esta passagem é absolutamente certa, mas há que não perder de vista o significado verdadeiro de preparação teórica. A preparação teórica na Engenharia é um fenómeno essencialmente quantitativo porque a sua finalidade é tratar os dados técnicos na base de princípios científicos exactos, e não conduzir o espírito através de concepções mais ou menos interessantes, mas das quais não resulta um interesse directo ou indirecto nas aplicaçõos. E pode mesmo dizer-se que a única sujeição que existe na preparação teórica reside na tendência de se transformarem problemas susceptíveis de projecção na Técnica, em assuntos de carácter abstracto, por mera deficiência de concretização. O perigo não está na Teoria, está na abstracção.

Em todo o caso, pode falar-se aqui de condicionalismo mas não pròpriamente de limitação. Esta só surge verdadeiramente quando a preparação teórica se diferencia em *preparação teórica de base* e *preparação teórica de transição*, porque esta última não pode deixar de se adaptar às condições específicas de organização dos cursos, sem perder, no entanto, a sua missão formativa, como parte integrante de uma unidade a que pertence.

No ano passado já tinha insistido sobre este ponto embora de uma maneira mais geral, dizendo:

«O progresso das nações sob o ponto de vista técnico exige um grau de especialização que seja a garantia de um elevado nível profissional. Mas é evidente que esse grau de especialização não pode ser adquirido na Escola, a não ser à custa de cursos de opção mais ou menos extensos, mas sem possibilidades práticas de realização, na maioria dos casos; sendo assim, a especialização tem de ser adquirida posteriormente e isso transforma os primeiros anos da vida profissional, num complemento indispensável da preparação escolar, mas já com um sentido vincado de utilidade directa. A Escola empenha-se por consequência em dar as bases científicas, em ensinar os fundamentos específicos e em modelar a formação do Engenheiro através de exemplos concretos, que reproduzam tanto quanto possível as condições da prática usual. E nestes exemplos cabem perfeitamente problemas de pesquisa suscitados pela própria Indústria, o que já em alguns países constitui uma forma de colaboração utilitária entre a Universidade e as Companhias Industriais.»

Não vejo que o problema possa ser encarado de outra maneira e por isso mesmo, ele perde o seu carácter unilateral, isto é, não pode ser resolvido sem uma colaboração real da parte da Indústria.

Se a Escola enveredasse pelo caminho de formar engenheiros com muito senso prático, com uma relativa experiência dos pormenores da vida industrial, teria de reduzir concomitantemente o seu plano de preparação teórica. É possìvel que isso tivesse vantagens imediatas para os problemas de momento das empresas; mas não seria com certeza a solução mais indicada para os planos de desenvolvimento e de progresso que pressupõem um nível técnico capaz de os dominar em toda a

([1]) James H. Boyd, «Chemical Engineering Progress». Julho de 1952.

sua extensão. Nos próprios países anglo-saxões em que as condições locais permitem dar aos cursos uma feição essencialmente prática, se nota a tendência para organizar cursos complementares em que os engenheiros adquiram a bagagem teórica indispensável para novos empreendimentos e novas realizações.

Foi publicado recentemente um relatório de uma visita aos Estados Unidos patrocinada pelo «British Productivity Council» no qual se inclui o aspecto pedagógico da Engenharia Industrial. Desse relatório, considero oportuno transcrever algumas passagens em que se evidenciam as tendências da opinião americana sobre o assunto:

«A tendência da opinião geral é que os cursos universitários da Engenharia têm favorecido a especialização demasiadamente cedo, e que se deveria dedicar mais tempo nos primeiros anos, a estudos humanísticos e de ciência fundamental.

. . . . . .

«Há uma tendência em alguns cursos universitários de engenharia industrial, de se lhes dar o carácter de complemento para graus mais avançados, o que equivale à criação de cursos post-escolares para os indivíduos mais aptos, e isso explica até certo ponto a diversidade de opinião expressa pelos industriais àcerca da formação dos engenheiros. Numa grande fábrica, ouvimos dizer que os engenheiros industriais «não tinham estofo nem bases dos princípios fundamentais», mas também que o engenheiro industrial é «o resultado de formações diferentes, sem uma unidade de preparação.»

Noutro ponto desse relatório diz-se:

«Esquece-se muitas vezes que a educação é um serviço influenciado pela oferta e a procura. Os engenheiros industriais não tiram cursos para trabalhar na indústria apenas porque existem cursos. Ninguém tira um curso a não ser que a Indústria mostre pelas suas acções que precisa dos engenheiros para o seu serviço e desde que os estudantes se convençam de que a engenharia industrial oferece prespectivas interessantes de vida. As Universidades e as Escolas Técnicas podem apenas definir uma orientação, como o têm feito até agora, e como o continuarão a fazer com certeza».

E ainda noutro ponto:

«Fomos impressionados pela preocupação das indústrias grandes e médias de organizar cursos dentro das fábricas para o aperfeiçoamento dos engenheiros industriais. Alguns desses cursos são específicos das necessidades das empresas, e não poderiam ser estabelecidos por entidades externas; mas outros que poderiam ser dados em cursos nocturnos, são preferìvelmente criados por algumas empresas por as Universidades serem muito distantes».

E, ainda finalmente:

«A ideia de que uma pessoa pode completar a sua educação e ganhar a sua vida, sem estudos ulteriores organizados, está a ser posta de parte por algumas firmas. As transformações da Técnica são tão rápidas que impõem um reajustamento contínuo; e este reajustamento pode realizar-se de uma maneira mais económica por meio de uma acção educacional organizada».

Mas é absolutamente certo que é muito mais fácil adquirir especializações totais ou parciais à custa de uma preparação sólida do que completar a formação de base, à medida que as exigências industriais reclamam a utilização prática de novos campos do pensamento.

É por estas razões que o Instituto tem insistido sempre na valorização da sua preparação teórica, como sendo a orientação que mais convém ao novo progresso industrial. E mais, tem procurado progressivamente estender o âmbito da preparação básica de transição, de modo a criar uma mentalidade à altura dos problemas dos nossos dias. Tem-no feito, em parte, à custa do sacrifício de uma

pretensa especialização, mas não me parece que o tema possa ainda ser objecto de controvérsias — basta a auscultação das tendências mundiais para o demonstrar.

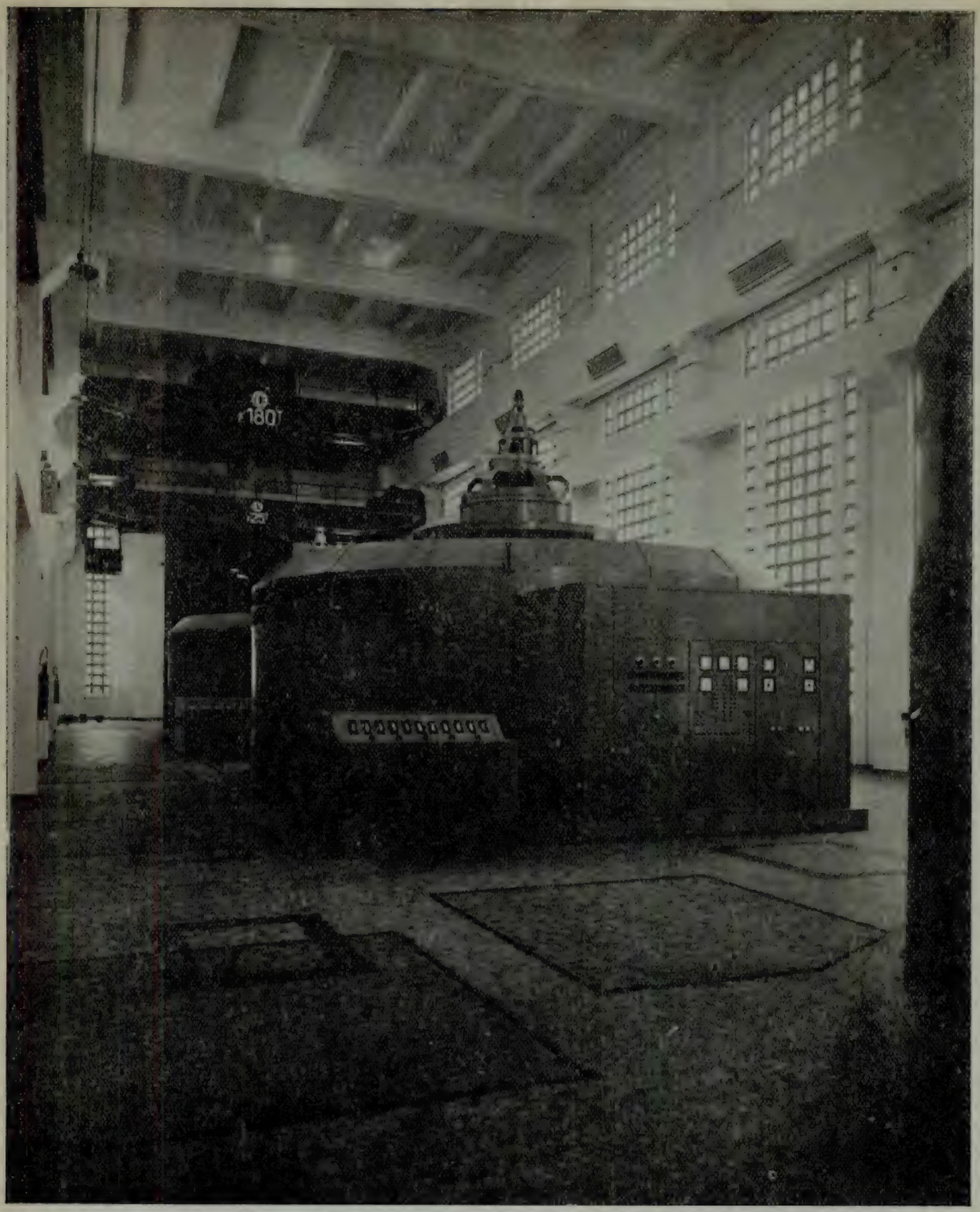
Mas afirmando isto, a Escola reconhece, com um certo coeficiente de humildade, que a sua acção se tem de limitar à formação de engenheiros em potencial; ou, por outras palavras, a sua função tem de ser fundamentalmente de moldação, sem pretensões de atingir a fase de acabamento, mesmo em campos restritos da actividade industrial.

Por isso, a Indústria não pode deixar de aceitar como postulado, que os primeiros anos da vida profissional tenham de ser efectivamente um «complemento indispensável da preparação escolar.»

É esta a missão que lhe compete voluntàriamente desempenhar para valorização dos seus elementos técnicos, completando num espírito de conjunto, um problema que a Escola só por si não pode resolver, mas para o qual contribui com todos os recursos da sua estruturação.

E por tudo isto, não me parece exagero classificar de «idealismo» a existência de um sentimento comum de valorização profissional, com um objectivo último de equipar a indústria do País, com os quadros indispensáveis ao seu progresso técnico e à sua valorização económica em todos os sectores.

SOCIÉTÉ ALSTHOM – Paris

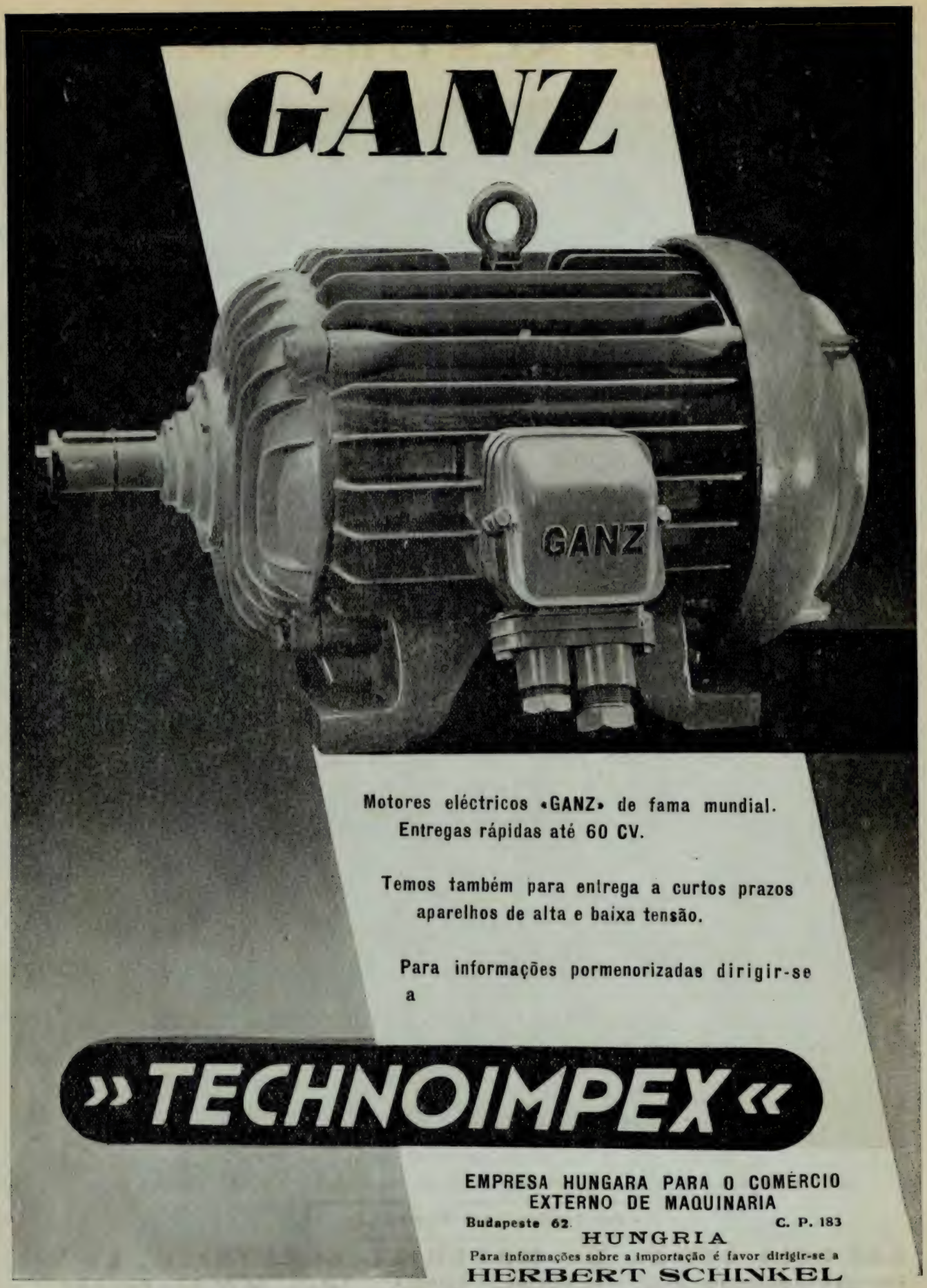


CENTRAL DE POUGET — Grupo de 42.000 KVA com turbina Pelton vertical — 10,5 KV — 300 r. p. m.

DELEGADOS EM PORTUGAL

AGÊNCIA GERAL DE MATERIAL ELÉCTRICO, L.DA

Rua dos Industriais, 4-1.° // às Cortes // LISBOA // Telefs. 66 60 82 - 66 06 92


GANZ
GANZ
Motores eléctricos «GANZ» de fama mundial.
Entregas rápidas até 60 CV.
Temos também para entrega a curtos prazos
aparelhos de alta e baixa tensão.
Para informações pormenorizadas dirigir-se
a
»TECHNOIMPEX«
EMPRESA HUNGARA PARA O COMÉRCIO
EXTERNO DE MAQUINARIA
Budapeste 62. C. P. 183
HUNGRIA
Para informações sobre a importação é favor dirigir-se a
HERBERT SCHINKEL
Avenida António Augusto de Aguiar, 187, 3.º-E. Tel. 44222
LISBOA

C. D. 543:66

A QUÍMICA ANALÍTICA E A INDÚSTRIA

PELO ENG.º QUÍMICO-INDUSTRIAL A. HERCULANO DE CARVALHO

Professor do I. S. T.

Conferência realizada durante a I Semana de Química

Para além do caracter formativo que inegàvelmente possui, a disciplina a que hoje se dá o nome de Química Analítica tem também no aspecto informativo uma evidente importância quando integrada num curso de Engenharia Químico-Industrial.

Isso resulta, directamente, dela nos ensinar alguns dos métodos mais úteis e até hoje insubstituíveis do chamado «contrôle» industrial e, indirectamente, da grande soma de conhecimentos sobre o comportamento químico de sistemas mais ou menos complexos que nela podem apreender-se.

Apenas me vou ocupar do objectivo directo da Química Analítica, mas não deixo de sublinhar que aquelas informações acessòriamente colhidas têm valor bem apreciável para a cultura profissional do engenheiro químico.

*

Inúmeros sectores da actividade humana exigem, modernamente, os mais variados serviços da Química Analítica só nos interessando agora os que à indústria, nomeadamente à indústria química e à metalurgia, dizem respeito.

Os problemas postos referem-se à apreciação da qualidade das matérias-primas e dos produtos fabricados e ainda à fiscalização do funcionamento das várias fases dos processos de fabricação.

Aqui os métodos químicos integram-se num conjunto mais geral denominado «contrôle industrial», mas dado que a Química Analítica se apropriou para os seus fins de variados métodos físicos de análise, nem sempre é fácil dizer onde acaba o seu domínio.

Por exemplo : muitos processos industriais exigem vigilância rigorosa e contínua da acidez real de soluções aquosas que neles participam ; para conseguir isso, usa-se um circuito potenciométrico de registo automático ligado a dois eléctrodos especiais que mergulham na solução em causa, obtendo-se assim o diagrama da variação do pH em função do tempo ou do volume escoado de solução. Estamos em face dum *método físico* de «contrôle», mas o certo é que tal método se ensina lògicamente em Química Analítica pois ele é, no fim de contas, um doseamento da actividade e portanto da concentração do ião H^+.

Outro exemplo : os gases que resultam de determinada fase do fabrico do ácido sulfúrico pelo processo clássico devem ter uma percentagem de «vapores nitrosos» (N_2O_4) compreendida dentro de certos limites. Posso tirar periòdicamente amostras do gás e dosear quìmicamente N_2O_4. Mas posso também ter um registo contínuo da percentagem desta substância na mistura e mesmo conseguir um dispositivo avisador, aproveitando a circunstância daquele gás ser corado e por meio de duas janelas, transparentes e opostas na canalização, iluminar através da mistura gasosa uma célula foto-eléctrica munida de filtro adequado. A intensidade da corrente fornecida pela célula é função da riqueza da mistura em N_2O_4. Aqui temos outro método físico de «contrôle» que é do âmbito da Química Analíca pois serve para dosear uma substância química.

Como estes, muitos outros exemplos concretos podiam apresentar-se, que simultâneamente ilustrariam o sentido da evolução actual da Química Analítica, primeiro ponto que eu desejo pôr em evidência : o recurso, cada vez mais frequente, aos métodos de análise de natureza física. Esta ati-

tude trás como consequência uma grande variedade da aparelhagem nos laboratórios de análise e uma dificuldade cada vez maior em estruturar o curso de Química Analítica com maior utilidade para o futuro engenheiro.

Mas o aspecto que quero especialmente focar é o seguinte : esta tendência actual desse ramo da ciência química resulta menos do aperfeiçoamento expontâneo dos seus métodos do que das solicitações da indústria. Certamente muitos dos progressos actuais da análise provêm fundamentalmente desta causa.

A indústria moderna é obrigada a evolucionar no sentido não só dum maior rendimento mas ainda da superior qualidade dos produtos fabricados. Para a melhoria de rendimento é preciso, entre outras coisas, economizar tempo e matérias-primas.

Para conseguir melhor qualidade há que dispor de matérias-primas mais puras e fiscalizar com eficácia e rapidez operações de fabrico cada vez mais delicadas.

Tudo isto se reflete nas exigências, de dia para dia mais rigorosas, que a indústria faz à Química Analítica, pedindo a esta novos métodos que, sem diminuirem em precisão, sejam mais sensíveis e expeditos. Outrossim se verifica, pelo que diz respeito à chamada análise de rotina, que a indústria lhe pede tarefas cada vez mais complexas.

Um exemplo: na guerra de 1914, quando pela primeira vez os minérios portugueses de volfrâmio tiveram grande procura, os compradores exigiam que neles se determinasse o teor do elemento principal: WO_3. Era uma única dosagem relativamente simples. Algum tempo depois a análise já abrangia mais duas dosagens: estanho e arsénio. Mais recentemente apareceram outras exigências, pedindo-se já com certa frequência que se determinem nesses minérios os teores de S, de P, de Ca, de Mo, etc.

A indústria metalúrgica é talvez, sobre este aspecto, a mais caprichosa e insatisfeita e o advento da era dos metais chamados raros, em que nos encontramos, mais vem acentuar essa feição.

Vale a pena comentar ainda que resumidamente a impropriedade do qualificativo de «raros» dado a esses elementos contra a qual se insurgia, já há mais de trinta anos, o primeiro professor de Química Analítica deste Instituto, o meu saudoso Mestre Charles Lepierre que, contra o hábito então corrente, incluia o seu estudo analítico no curso que regia.

O progresso industrial veio dar-lhe plena razão.

Aliás, alguns desses metais existem em grande disseminação e por vezes até em concentrações consideráveis na crusta terrestre: são assim, por exemplo, o titânio, o urânio, o zircónio. Tratava-se apenas de metais cujo emprego na indústria era muito limitado mas assistimos hoje precisamente à expansão do seu emprego. Não eram *raros*, mas simplesmente *inaproveitados* e por isso pouco estudados analìticamente. Esta circunstância e ainda o facto dum grande número desses elementos, especialmente os que pertencem ao grupo das «terras raras», que hoje se chamam «lantanídeos», serem de separação analítica muito difícil ou mesmo impossível e ainda de delicada dosagem, mais vêm complicar a tarefa do químico-analista, que agora se vê forçado a ocupar-se deles.

Temos pois que, além de maior sensibilidade e maior rapidez de execução dos métodos, se pede hoje ao químico-analista grande densidade de trabalho (determinações mais numerosas) e operações mais difíceis e complexas.

Um outro exemplo de grande actualidade mostrará à evidência estes vários aspectos.

No urânio metálico destinado aos reactores nucleares, o qual se fabrica com requintes de aceio e de higiene que põem a respectiva instalação metalúrgica a par das salas de operações dum hospital moderno, há que pesquisar e dosear obrigatòriamente para cima de meio cento de impurezas. Algumas dessas são prejudiciais mesmo existindo em concentração inferior a uma parte por milhão e têm portanto de ser determinadas por métodos extraordinàriamente sensíveis (o boro, por exemplo). Outras são difíceis de separar do urânio e há que recorrer a técnicas especiais. Mas a questão mais grave é a do tempo e da quantidade do pessoal analítico: por mais expeditos que sejam os métodos de análise que se empreguem (colorimetria, espectrografia, etc.) só pelo aumento desproporcionado dos analistas do laboratório de «contrôle» se consegue um ritmo de fiscalização que não vá atrazar o fabrico.

Disse «desproporcionado», pois não é de admitir que o pessoal adstrito à fiscalização analítica iguale ou mesmo exceda o pessoal da própria fábrica.

Ora isto já sucede por vezes e, mesmo fora destes casos extremos, quem hoje visite uma instalação fabril verdadeiramente actualizada fica impressionado com a relativa hipertrofia dos laboratórios analíticos que a servem, circunstância que vai pesar sensìvelmente sobre a economia da indústria.

A solução para evitar que este carácter se acentui tem sido procurada na investigação de novos métodos mais rápidos e adequados. Ora como os centros universitários são insuficientes para resolver os numerosíssimos problemas deste género que surgem na indústria, ela própria trata de montar, ao lado dos laboratórios de «contrôle», outros de investigação analítica. Não há assim, imediatamente, economia de pessoal, mas que outro modo poderá empregar-se?

É inegável que a chamada «instrumentação» tem realizado admiráveis progressos em certas análises e sob este aspecto é sem dúvida a espectrografia e a electrónica que até agora têm permitido maiores avanços no campo do «contrôle» analítico automático.

Mas alguns problemas permanecem insolúveis a despeito deste e doutros valiosos concursos.

Não pode dizer-se que os centros de investigação analítica estejam pouco activos. A massa de trabalhos deste género que mensalmente aparece nas revistas é impressionante e os métodos novos surgem cada vez com maior densidade. Citarei apenas alguns dos que apareceram nos últimos quinze anos: cromatografia, permutação iónica, extracção selectiva com solventes orgânicos, isótopos radioactivos, fluorescência de raios X, activação com neutrões, amperimetria, coulometria.

Estão longe de estar esgotadas as possibilidades destes métodos, mas apesar do elevado número de pessoas que hoje se ocupam no mundo da investigação do campo da Química Analítica, sente-se que um rápido progresso no sentido desejado exige ainda mais numerosa contribuição e, se possível fosse, uma acção coordenadora.

Como esta é por enquanto impossível no plano internacional, em cada país se deverá tentá-la, que mais não seja por uma estreita colaboração entre a indústria e as escolas e institutos oficiais.

Para mim, a oportunidade de pôr a indústria em contacto com os problemas da Escola, que forma os seu futuros engenheiros, é certamente o aspecto mais proveitoso desta louvável iniciativa da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, à qual eu presto as minhas sinceras homenagens.

É certo que em Portugal já temos exemplos frutuosos da colaboração íntima que deve existir entre os laboratórios de investigação e a indústria, mas julgo que a acção coordenadora verdadeiramente eficaz só poderá conseguir-se através dum organismo oficial que, centralizando os estudos necessários ao «contrôle» e à normalização industriais, disponha ainda de laboratórios suficientemente vastos e devidamente apetrechados para realizar investigações com objectivos úteis para o progresso da indústria e do racional emprego das matérias-primas nacionais. Pode aproveitar-se muito de bom que já existe disperso, completando-o e estruturando o conjunto de modo a que ele possa trabalhar num ambiente semelhante ao que hoje se respira já em organismo similar, criado em boa hora, e cujos serviços prestados no sector da Engenharia Civil são já hoje notáveis.

A nossa indústria transformadora merece tratamento semelhante. A ideia, que tive ocasião de defender há oito anos numa nota apresentada à Academia das Ciências, não é felizmente só minha, e isto me dá esperança de que ela venha a concretizar-se um dia não muito distante.

*

Sinto-me no dever, de incluir nestas minhas observações algumas sobre o ponto que certamente mais interessará aos alunos do Instituto, a quem se dirigem principalmente as minhas palavras, e afinal também aos engenheiros que me escutam. O que deve ensinar-se de Química Analítica ao futuro engenheiro químico-industrial?

Começo por fazer a confidência de que, pessoalmente, me convinha evitar o assunto . . . Ou vou dizer apenas que inteiramente me satisfaz o curso que ministro aos meus alunos — o que não é verdade, ou confessarei que após mais de trinta anos de regência ainda me surgem dúvidas quanto à inclusão ou exclusão de certas matérias — o que seria uma espécie de auto-certificado de incapacidade profissional.

O melhor é abstrair, tanto quanto possível, da minha qualidade de professor e tentar raciocinar sem limitação pessoal.

Verifico em primeiro lugar que a significação actual da expressão «engenharia química», ou pelo menos aquela que é hoje adoptada nos Estados Unidos e admitida já um pouco por toda a parte na Europa, é diferente da que se aceitava há vinte anos. Podemos hoje considerá-la como uma especialização dentro da engenharia química de tipo clássico, especialização que se tem desenvolvido tanto e possui tanta importância que, mesmo nos países em que não possa ter autonomia formando um curso completo, terá mesmo assim de considerar-se como a espinha dorsal de qualquer curso de engenheiros químicos. Isto quer dizer que as matérias clássicas de química deixaram de ser o suporte *essencial* do curso.

Mas reconhecer esta realidade não é afirmar que tais matérias perderam importância, nem que seja admissível organizar tal curso esvasiando-o de qualquer conteúdo químico.

O que é necessário é seleccionar entre as matérias clássicas aquelas que continuam a ser indispensáveis à formação e à vida profissional do futuro engenheiro.

Não pode dizer-se que a nossa Escola se tivesse alheado dessa evolução. Assim a actual cadeira de Química Tecnológica mostra que a evolução foi lùcidamente compreendida. E, pelo que respeita à Química Analítica, houve redução do antigo curso teórico de seis semestres para três.

A dificuldade está em bem aproveitar o tempo assim comprimido.

Já aqui foi posto em foco pelo meu colega, o Prof. Almeida Alves, a importância cada vez maior, e hoje unânimemente reconhecida, da preparação teórica do engenheiro. Julgo que nas cadeiras de aplicação, como é a Química Analítica, o primeiro passo a dar é estabelecer os princípios em que assentam os seus métodos, deduzindo-os dos fundamentos teóricos aprendidos na Física e na Química Inorgânica — cujo nome é impróprio mas cujo programa felizmente, é hoje constituído pelas noções basilares de mecânica química e de química-física. Por isto se justifica que a Química Analítica apareça só no terceiro ano do curso, ao contrário do que ainda sucede, injustificadamente, nas Faculdades de Ciências onde, com o velho nome de Análise Química, ela aparece logo no primeiro ano. É defeito a remediar, reconhecido pelos próprios professores.

Julgo ainda que mesmo com certo prejuízo da substância informativa dessa disciplina, os princípios se devem estudar com a insistência suficiente (o que não quer dizer exagerado desenvolvimento nem grande minúcia) para que formem o «fundo» e o suporte de tudo o que vai seguir-se.

Vem a propósito citar umas sensatas palavras de George D. Beal, do Mellon Institute, na Conferência de Química Analítica realizada em Março deste ano em Pittsburgh. Dizia ele, referindo-se aos químico-analistas de profissão:

«Temos hoje dois tipos de analistas: aqueles que compreendem perfeitamente o que estão a fazer e aqueles que inteiramente confiam no oscilar das agulhas e no pestanejar de luzes. Não devemos deixar de animar os do primeiro grupo pois que, sem eles, não pode haver explicação para o significado do pestanejar das luzes». E continua:

«Ao apreciar os processos analíticos, vêm vividamente ao espírito as palavras de Pope» (traduzo livremente):

«Usanças e palavras seguem a mesma lei:
novas demais, velhas demais, não ficam bem.
Em usar a novidade, não sejas apressado,
nem o último a pôr, o que é velho, de lado».

A citação tem aqui uma grande oportunidade, pois há certos capítulos da Química Analítica de há cinquenta anos que têm ainda uma acção formativa mais vincada no seu aspecto laboratorial, pois não distanciam tanto as operações laboratoriais das operações da indústria.

O nosso saudoso colega João Lopes Raimundo definia assim o primeiro contacto do nóvel engenheiro químico com a indústria: «é o salto do miligrama para a tonelada».

A expressão é feliz e até no seu sentido literal tem realidade prática. Assim julgo que no laboratório de Química Analítica se devem continuar a praticar métodos qualitativos na escala chamada de «macro», isto é com tomas que podem atingir e até exceder o grama, dando lugar a precipitados volumosos, lavagens difíceis, etc. Se o curso se destinasse simplesmente a formar químico-analistas, eu não hesitaria em lhes ensinar a trabalhar exclusivamente em escala de semi-micro, abolindo as antigas técnicas.

À medida que novas aplicações pedem à indústria maior pureza dos seus produtos, as operações fabris vão-se aproximando do tipo laboratorial. Certas técnicas hodiernas seguem mesmo, a par e passo, o método de separação analítica e quando o químico-analista estuda, para os seus fins de investigação, novos processos de dosagem ou separação, já hoje o faz com a consciência de que a indústria, principalmente a metalurgia, pode beneficiar directamente com a sua actividade. São exemplos recentes a preparação do óxido de urânio puríssimo e a metalurgia de alguns metais raros.

❋

O que complica uma perfeita selecção de matérias a ensinar é outra realidade irremediável: por enquanto as nossas escolas superiores de engenharia têm de formar diplomados em química que possam vir a ocupar-se com competência, uns do aspecto «chemical engineering», outros dos laboratórios e gabinetes de investigação das fábricas e até dos próprios laboratórios de análises «de rotina» e ainda outros — os mais numerosos, que terão de tratar um pouco de tudo!

A consciência desta realidade obriga então muitas vezes a transigir perante um esquema de ensino que não seria certamente o ideal para cada um dos casos.

❋

Antes de terminar, parece-me interessante focar ainda dois pontos.

O carácter formativo da Química Analítica, no que ele tem de útil para o futuro engenheiro, é conferido fundamentalmente no laboratório e uma boa parte da exposição «teórica» tem de ser gasta, não só com os princípios físico-químicos que estão na base dos processos de análise, mas ainda com os princípios específicos do funcionamento dos instrumentos de física que hoje em dia são de uso corrente no laboratório e na indústria. Porque eles são cada vez mais numerosos e variados, o seu estudo tem de ser relegado às vezes para outras cadeiras, o que poderia justificar até a criação duma cadeira especial.

O segundo ponto diz respeito ao aspecto informativo da Química Analítica.

Há tendência, que já vem de longe mas começa felizmente a ser corrigida, para inferiorizar a memória perante a inteligência. Isto é talvez uma reacção contra o que se passava no nosso ensino há cinquenta anos, quando ele era feito de maneira a sobrecarregar especialmente a memória dos alunos. Qualquer das atitudes é exagerada.

O homem nas suas reacções perante o meio e as circunstâncias nunca se detém no meio termo, onde aliás ele afirma estar a virtude...

Parece-me que sem abusar da memória, se deve apelar para ela sempre que é preciso.

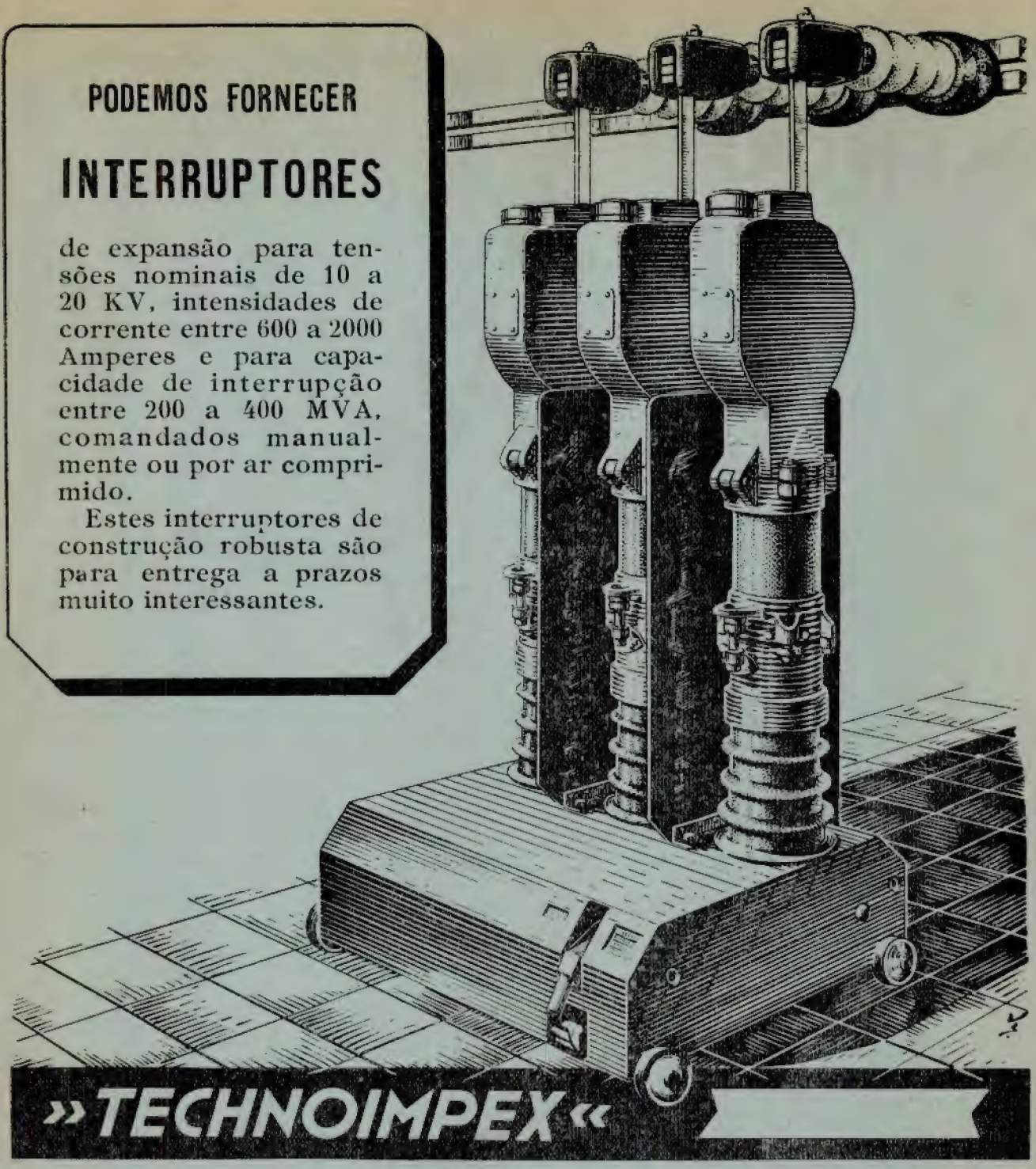
Não tendo de cór duas ou três reacções mais importantes de cada elemento e alguns métodos mais úteis de dosagem, não se sabe de facto Química Analítica. A racionalização crescente da ciência não dispensa ainda ninguém de fixar na memória muita matéria informativa que ali permaneça em estado de rápida utilização.

Também me parece indispensável que se executem nas aulas práticas algumas análises, mesmo complexas. Isto não confere aptidão para ser analista, nem tal se pretende aqui, mas é o único meio de habilitar o aluno a apreciar o verdadeiro valor e o significado dos resultados analíticos, coisa que o engenheiro químico tem de fazer muitas vezes e tem de fazer bem. Esta circunstância, só por si, justifica o interesse da indústria em que os seus engenheiros tenham uma cultura «analítica» suficiente. Quanto pròpriamente ao químico-analista, de dia para dia a sua actividade se torna mais necessária à indústria, a qual lhe pede tarefas múltiplas e de complexidade crescente.

*

Ao findar estas notas, vejo mais dum motivo para pedir desculpa aos meus ouvintes.

Não só foi deficiente o ordenamento das matérias que tratei, como ainda traí o título desta palestra que, em mais dum passo, merecia antes est'outro: dúvidas dum professor de Química-Analítica.



EMPRESA HÚNGARA PARA O COMÉRCIO EXTERNO DE MAQUINARIA

Budapeste 62 C. P. 183

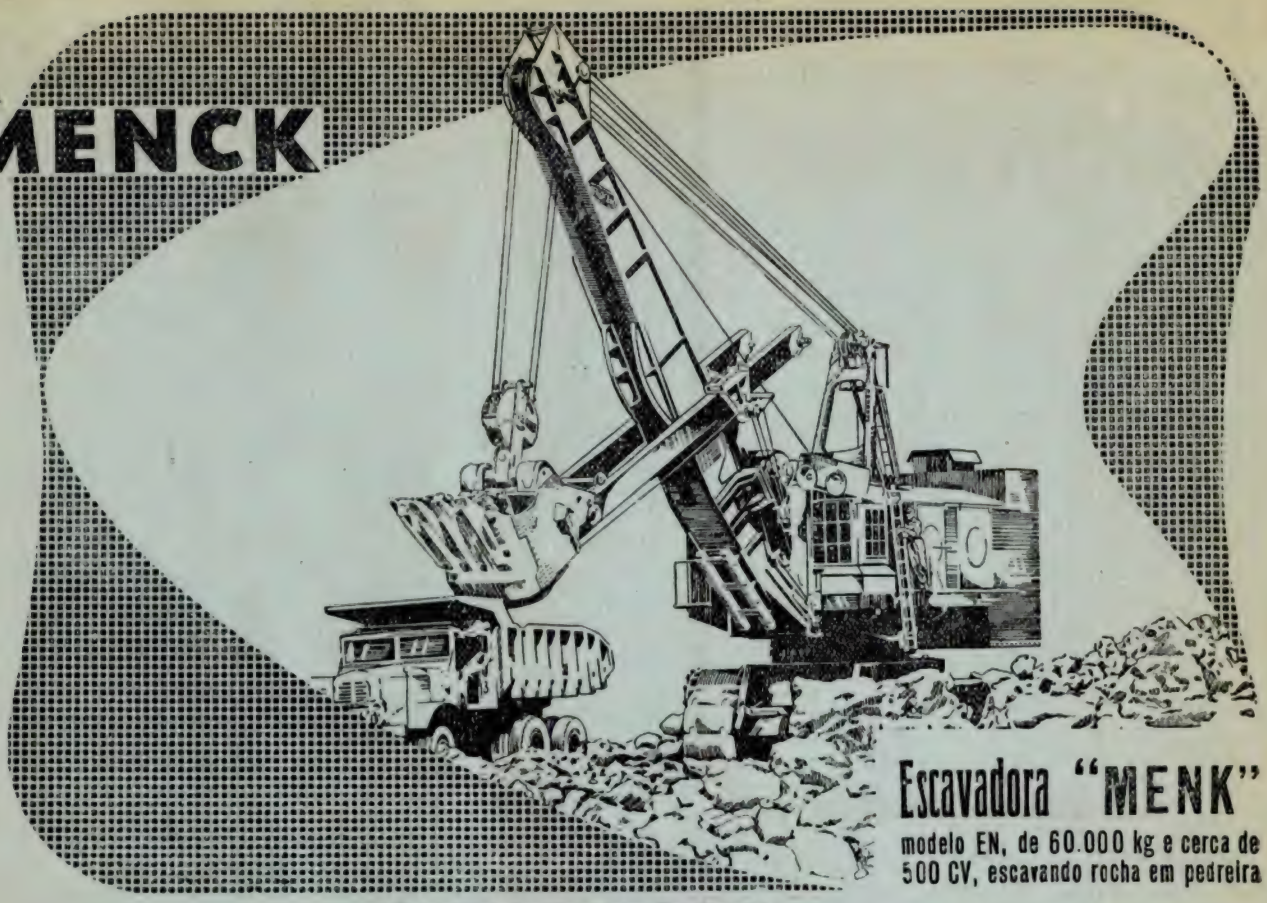
HUNGRIA

Para informações sobre a importação é favor dirigir-se a

HERBERT SCHINKEL

Avenida António Augusto de Aguiar, 187, 3.º E — Tel. 44222 — **LISBOA**

MENCK



Escavadora "MENK"

modelo EN, de 60.000 kg e cerca de 500 CV, escavando rocha em pedreira

Representantes em Portugal:

Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, L.da
PORTO — Praça da Liberdade, 114

Eng.º J. E. Michaëlis de Vasconcellos
LISBOA — R. Fialho de Almeida, 1

SKF

ROLAMENTOS
CHUMACEIRAS

LISBOA PRAÇA DA ALEGRIA 66-A Telef. 33995 - 34223
PORTO AV. DOS ALIADOS 150—152 Telef. 29776 - 29777

C. D. 532.584.2

ALGUNS ASPECTOS DO TRANSPORTE SÓLIDO EM PROBLEMAS HIDRÁULICOS

PELO ENG.º CIVIL (I. S. T.) ARMANDO LENCASTRE

Chefe da Secção de Hidráulica Fluvial do L. N. E. C.

São múltiplos, no domínio da engenharia, os problemas relacionados com o transporte de materiais sólidos por meio da água: estabilidade do ponto de vista de assoreamento ou erosões, dos leitos e margens dos cursos de água naturais ou dos canais artificiais; assoreamento das albufeiras com prejuízo da sua função reguladora dos caudais líquidos; decantação de águas a fornecer às populações, etc.

Estes problemas têm sido, ùltimamente, objecto de estudos aturados, quer em Laboratório quer na Natureza. Basta recordar os congressos internacionais ùltimamente realizados, nos quais o transporte sólido constitui o assunto principal e até o exclusivo:

A. I. R. H. «Association Internationale de Recherches Hydrauliques», reuniões de 1948 em Estocolmo, 1951 em Bombaim e 1953 em Minneapoles; «Deuxième Journée de l'Hydraulique», em 1952 em Grenoble.

É finalidade destas breves notas analisar alguns problemas relacionados com este assunto: o transporte sólido na natureza; leis do transporte sólido por arrastamento; leis do transporte sólido por suspensão; dimensionamento de canais estáveis.

A complexidade de cada um destes fenómenos, a falta de conhecimentos seguros sobre as leis que os regem e as hesitações que se notam nos próprios centros de investigação que deles se ocupam, obrigam, num grande número de casos, a ficar no domínio das ideias gerais.

Um conjunto de referências bibliográficas poderá, no entanto, facilitar a tarefa de quem se interesse por um conhecimento mais pormenorizado destes problemas.

A — O transporte sólido nos cursos de água naturais

I — *Generalidades*

No intuito de esquematizar, consideraremos que o transporte de materiais sólidos por meio da água se realiza das seguintes maneiras:

1 — Por arrastamento, sobre o fundo — «Charriage» ou «Bed load».

2 — Em suspensão — «Suspension» ou «Suspended load».

Entre estas duas maneiras de transporte existe o transporte por saltação: os materiais são alternadamente arrastados e transportados por pequenos saltos.

Não é intuito destas breves notas encarar o problema do transporte por suspensão coloidal ou por dissolução.

Os limites destas várias formas de transporte, como aliás sucede na grande parte de fenómenos naturais, são difíceis de definir.

O modo de transporte, para as mesmas condições hidráulicas, é função das dimensões dos materiais: as partículas de menor diâmetro são transportadas em suspensão; as de diâmetro maior são transportadas por arrastamento.

O diâmetro médio das partículas pode variar entre metros e microns. Assim, a montante de Vicksburg, no Mississipi, observaram-se sedimentos com 40 % de materiais de diâmetro inferior a 1μ. O limite superior do diâmetro dos materiais transportados por arrastamento é função da energia da corrente.

Quanto à origem, os materiais transportados por um curso de água natural podem sempre considerar-se oriundos da própria bacia, sendo, duma maneira geral, idênticos os factores mete-

reológicos que originam o caudal líquido e o caudal sólido.

Define-se «degradação específica» a quantidade total de materiais arrancados à bacia por unidade de área, em ano médio. Chama-se «turvação específica», à relação entre a mesma quantidade total de materiais e o volume total líquido escoado.

Nas regiões sub-áridas as degradações específicas nas bacias principais são superiores a muitas centenas de toneladas por km². São ainda superiores os valores observados em regiões sub-áridas sujeitas a fortes cheias ou cujo solo apresenta grandes extensões de «löess» chegando a atingir valores descomunais em certos rios da China e da Índia. Em altas montanhas a degradação específica costuma ser grande sobretudo nas zonas de grandes altitudes, onde a vegetação é sempre pouca. É fácil encontrar sectores em que são arrancadas à bacia 500 a 1.000 toneladas por km², e mais; no entanto, como os caudais são também grandes, 25 a 50 l/s e km², ou mais, a «turvação específica» não é excessiva.

Nas regiões de colinas e de planície dos países temperados registam-se geralmente «turvações específicas» fracas, embora muito variáveis em regiões vizinhas, sendo factor dominante a configuração topográfica. A variação nos países inter-tropicais é ainda menor, podendo haver valores variando de 3 kg a 0,1 kg por metro cúbico ([1]).

No quadro seguinte resumem-se alguns dados concretos, extraídos da obra já citada. Não encontrámos qualquer referência aos nossos rios, o que mostra a necessidade de finalmente se encararem também entre nós, estes problemas.

País	Características da bacia	Rio	Secção Considerada	Turvação específica kg/m³
U. S. A.	Sub-Árida	Colorado	Grande canhão	11,7
U. S. A.	Sub-Árida	S. Juan	Bluff	17,2
México	Sub-Árida	Rio Grande del Norte	Butte	17,0
Algéria	Sub-Árida	Isser	Tablat	20,0
Algéria	Sub-Árida	Ksob	Barragem	13
África do Sul	Sub-Árida	Sundays River	Lac Ments	18,5
África do Sul	Sub-Árida	Great Fish River	Lake Arthur	33,5
China	Sub-Árida	Rio Amarelo	Cheusieu	44
China	Sub-Árida	King-Ho	—	100-150 (*a*)
U. S. A.	Sub-Árida	Little Colorado	—	77,6 (*a*)
México	Sub-Árida	Rio Tuerco	—	144 (*a*)
Índia	Alta Montanha	Kosi	Chatra	2,82
França	Alta Montanha	Drac	—	0,8
França	Alta Montanha	Isère	Grenoble	0,6
Suíça	Alta Montanha	Reno	Lac Constance	0,8
Suíça	Alta Montanha	Ródano	Genève	0,8
Itália	Alta Montanha	Adige	Trente	0,22
Itália	Alta Montanha	Izougo	Canale	0,17
Itália	Alta Montanha	Piave	Segusino	0,15
Itália	Alta Montanha	Pó	Meirano	0,80
Itália	Alta Montanha	Brenta	Sarson	0,06
França	Colinas	Loire	—	0,1 — 0,2
França	Colinas	Sena	—	0,1 — 0,2
Europa Central	Colinas	Elba	—	0,1 — 0,2
Idem	Colinas	Meuse	—	0,1 — 0,2
Idem	Colinas	Saon	—	0,1 — 0,2
Idem	Colinas	Volga	—	0,1 — 0,2

(*a*) A enormidade destes valores é realçada pelos valores referentes a rios de alta montanha e colinas indicadas a seguir.

II — *Medição do material sólido transportado por arrastamento*

O caudal sólido transportado por arrastamento, num ponto do leito dum curso de água, é medido por meio de aparelhos constituídos fundamentalmente por uma caixa, com a boca virada contra

([1]) Pardé — «Sur les Valeurs de la Turbidité Spécifique des Rivières» — «Deuxième Journées de l'Hydraulique» — Grenoble 1952.

a direcção do escoamento e colocada no fundo, junto do leito. Admitindo uma permanência no tempo das características do escoamento, é aparentemente fácil, pela pesagem do material recolhido e pelo tempo de colocação do aparelho, deduzir o valor médio a atribuir ao caudal sólido transportado por arrastamento, no ponto de medida.

Este método, simples na sua concepção, complica-se bastante visto que, a existência do aparelho no fundo vai alterar as condições do escoamento no ponto em que ele se coloca, diminuindo a quantidade de material entrado. Há pois necessidade de definir um «coeficiente de eficácia» como a relação entre a quantidade dos materiais recolhidos e a quantidade dos materiais que efectivamente passariam nesse ponto, se lá não estivesse colocado o aparelho.

Existem várias realizações mais ou menos aperfeiçoadas deste sistema, sendo a sua eficácia determinada por meio de ensaios prévios de Laboratório.

Neste domínio são particularmente notáveis os trabalhos do Dr. H. A. Einstein realizados na «École Polytèchnique» de Zürich.

Em resumo constatou-se nestes ensaios o seguinte:

— a elasticidade dos cabos originava um efeito da dragagem que podia falsificar os resultados;

— as dimensões mais aconselháveis para as caixas seriam de $1 \times 0{,}50 \times 0{,}25$, respectivamente para comprimento, largura e altura;

— o coeficiente de eficácia média era da ordem de 0,45 sendo independente do grau de enchimento da caixa, quando este enchimento não ultrapasse 1/3 do volume total;

— para pequenos caudais havia tendência em captar uma maior percentagem de materiais grossos; para grandes caudais verificava-se a tendência oposta em captar maior percentagem de materiais finos ([1]).

Outro problema que igualmente dificulta a medição do caudal sólido transportado por arrastamento, é a existência de grandes flutuações das quantidades de materiais carreados verificando-se em modelos períodos da ordem de 1 a 16 horas. Assim, para se obter um valor médio no tempo, em cada ponto de medida, serão necessárias várias horas de observação tornando-se a operação bastante demorada e dispendiosa. Este método apresenta no entanto a vantagem de dar resultados cada vez mais precisos, embora à custa de operações cada vez mais longas e mais numerosas.

O caudal sólido total transportado por arrastamento numa secção obter-se-ia por integração efectuada a partir dos resultados pontuais.

Em vez das medições pontuais, poderia imaginar-se um processo de medir, dum modo contínuo, o material transportado por arrastamento. Bastaria abrir uma fossa em toda a secção da ribeira, e dragar duma maneira quase contínua os materiais aí depositados. A fim de não alterar o perfil longitudinal a jusante, facto que originaria um regime variável no tempo, diferente do inicial, haveria necessidade de restituir ao curso de água todos os materiais dragados. Este inconveniente poderia ser evitado colocando a fossa próximo de uma secção de controle situada a jusante duma zona em regime uniforme e mantendo uma cota fixa.

Os produtos de dragagem poderiam então compensar de qualquer modo as despesas de instalação.

Não é porém técnica correntemente seguida a não ser em modelos, podendo contar-se como excepção o emprego deste método na natureza, sem dúvida devido ao grande custo da sua realização.

Conclui-se pois que qualquer dos métodos resumidos anteriormente é moroso e dispendioso, havendo necessidade de recorrer a outras fontes de informação.

Uma delas pode ser o conhecimento das leis que regem o fenómeno, e à qual nos referiremos no capítulo seguinte.

Outra, talvez a mais generalizada, baseia-se na observação do caudal sólido total que se deposita em reservatórios naturais ou artificiais.

A partir de sondagens feitas com precisão pode-se, por cubatura, saber o volume depositado em determinado período. A análise dos materiais e a configuração dos depósitos permite distinguir, com certa aproximação, os materiais transportados por arrastamento daqueles que foram trazidos em suspensão.

Segundo Stevens ([1]) a percentagem de mate-

([1]) Labaye — «Note sur le Debit Solide des Cours d'Eau» — «La Houille Blanche» N.º A — 1948.

([1]) J. C. Stevens — «The Silt Problem, Trans. A. S. C. E.» — 1936.

rial transportado por arrastamento é, geralmente 10 a 20 % do total, mas pode atingir valores como 50 %.

Embora esta maneira de proceder dê resultados bastante precisos, não permite estabelecer a função que liga os diferentes caudais sólidos transportados por arrastamento com os caudais líquidos que os originaram. Adiante se voltará a este assunto, ao tratar-se da medição global de caudal sólido.

III — *Determinação do caudal correspondente ao início de arrastamento*

Citaram-se já dificuldades práticas em determinar a relação entre caudais líquidos e sólidos, limitando-nos em geral a ter um conhecimento global dos materiais carreados. Torna-se porém necessário, por vezes, conhecer o caudal correspondente ao início do arrastamento, sobretudo como elemento indispensável para o estudo do fenómeno em modelo reduzido.

Os métodos empregados nesta determinação são essencialmente acústicos, mais ou menos aperfeiçoados.

O mais simples consiste em colocar no fundo uma chapa metálica e procurar ouvir, para uma sucessão crescente de caudais, o instante em que se começa a ouvir o choque do material transportado com a placa. Este sistema rudimentar poderá dar algumas indicações em casos particulares: pequena profundidade de água e material carreado de dimensões apreciáveis.

Um aperfeiçoamento deste princípio deu origem ao «Detector Hydrofónico».

Uma realização deste aparelho consiste numa placa triangular colocada no fundo, ligada a um microfone encerrado numa caixa estanque. O microfone está ligado elèctricamente a uns auscultadores. Nalguns modelos deste aparelho, a caixa estanque contendo o microfone está colocada alguns centímetros acima da placa e está ligada a esta por montantes acùsticamente isolados.

Noutros modelos a caixa do microfone está colocada directamente sobre a placa. Entre o microfone e os auscultadores está colocado um amplificador.

Há indicação de se obterem, com este aparelho, resultados absolutamente satisfatórios ([1]). Seria interessante também registar os sons emitidos a fim de eliminar, tanto quanto possível, o factor pessoal; além disso, por meio de vários registos comparados, poder-se-iam treinar os observadores.

IV — *Medição do material sólido transportado em suspensão*

Embora o fenómeno da suspensão seja bastante mais complicado do que o fenómeno de arrastamento, as medidas pontuais apresentam-se no entanto de mais fácil realização.

São numerosos os aparelhos, baseados em princípios bastante diversos, de alguns dos quais damos, a seguir, uma referência sumária.

O Batómetro de Gluschkov ([1]) data do início do século e é de construção extremamente simples: um tubo metálico com um saco de borracha numa das extremidades. O saco é mergulhado na posição A indicada na fig. 1. Um mecanismo especial coloca o tubo na posição B da mesma figura; simultâneamente um conta segundos mede o tempo passado o qual o saco se fecha e se recolhe (posição C). Pela quantidade de água entrada durante o tempo de funcionamento, e por meio de uma curva de aferição estabelecida a partir de molinetes ou tubos de Pitot, determina-se a velocidade média da água no ponto de medida. Pela análise da amostra recolhida, conhece-se a quantidade e a qualidade do material em suspensão.

A Sonda Collet ([1]) consta essencialmente dum cilindro de eixo horizontal, com duas tampas em cada uma das extremidades, o qual é colocado na direcção da corrente; um mecanismo permite o desfecho rápido e simultâneo das duas tampas. A amostra assim obtida é analisada como no caso anterior.

A Turbidisonda Neyrpic ([2]) de princípio semelhante à anterior, é constituída fundamentalmente por uma garrafa cujo comando de abertura e de fecho é feito por ar comprimido; a garrafa mantém-se fechada até ao ponto em

---

([1]) Braudeau — «Quelques Tèchnique pour l'Étude et la Mesure du Débit Sólide» — «La Houille Blanche» — N.º A — 1951.

([1]) Para descrição mais pormenorizada, consulte-se: Labaye — obra citada.

([2]) Para descrição mais pormenorizada ver Danel — «Charriage en Suspension» AIRTH — 1948.

que se vai fazer a medição. Este sistema parece apresentar, em relação aos anteriores, a vantagem de perturbar menos o escoamento na sua vizinhança durante a operação.

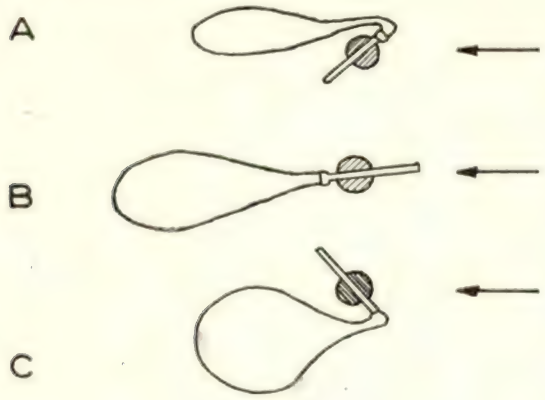


Fig. 1

Os Turbidímetros com células fotoeléctricas ([1]) baseiam-se nas experiências laboratoriais de Richardson, segundo as quais, para grãos uniformes de diâmetro compreendido entre 6 e 20 microns, existe uma relação biunívoca entre a transparência e a concentração. A aplicação do turbidímetro com uma célula fotoeléctrica está limitada a grãos mais ou menos uniformes, dentro dos limites das experiências atrás citadas. Um aperfeiçoamento que parece eliminar em grande parte estes inconvenientes é o turbidímetro com dupla célula fotoeléctrica o qual consiste fundamentalmente num colimador que envia um feixe de luz paralela através da suspensão. Duas células fotoeléctricas, colocadas respectivamente num plano perpendicular e num plano paralelo ao feixe medem as quantidades de luz transmitida e difractada a 90º. Curvas experimentais traduzem as variações destas quantidades para diferentes tipos de materiais e para misturas destes em proporções conhecidas. A fim de obter mais informações sobre a granulometria, há tendências para empregar mais de 2 células fotoeléctricas. Com efeito, os fenómenos ópticos que intervêm são mais complicados do que uma simples sobreposição duma transmissão e duma difusão perpendicular. Existem aparelhos deste tipo bastante aperfeiçoados empregados na observação de águas potáveis.

([1]) Para descrição mais pormenorizada consulte-se: Braudeau — «Le Turbidímetre à Double Célule Photo-Electrique» 2ème Journée de L'Hydraulique — Grenoble — 1952.

As amostras colhidas por meio dos aparelhos acima descritos (à excepção dos de célula fotoeléctrica) ficam em sedimentação, de modo a obter a deposição da maior parte do material em suspensão. Por filtração pode obter-se o restante material suspenso.

O conhecimento da granulometria torna-se bastante mais complicado. A peneiração, a centrifugação e o estudo com microscópio simples ou electrónico com o auxílio da fotografia, são os mais indicados na determinação do diâmetro das partículas. Estas técnicas não são aliás específicas deste problema, pelo que não nos deteremos mais tempo neste assunto.

Outro problema importante consiste no estabelecimento da cadência e número de observações. Com efeito a concentração, num dado momento, depende essencialmente da localização das chuvas e da natureza e estado dos terrenos em que elas caem. De verão, uma pequena variação do caudal pode fazer variar muito a concentração. Observações efectuadas em França, na Durance, registam, para pequeníssimas variações de caudal, variações de concentração de 0,1 gr/l a 30 gr/l. Pelo contrário, de inverno, podem registar-se grandes variações do caudal, sem que a concentração de materiais suspensos varie apreciàvelmente. Deste modo, a quantidade de materiais transportados em suspensão está longe de ser uma função biunívoca dos caudais líquidos, como sucede na maior parte dos casos de transporte por arrastamento. Por outro lado, para o mesmo estado do curso de água e na mesma secção, a percentagem de materiais suspensos varia fortemente de uma região para outra.

Estes factores criam a necessidade de grande número de medições (no tempo) e em grande quantidade de pontos da secção de medida. Cada uma delas deve também demorar o tempo suficiente de modo a obter-se um valor médio local.

Um trabalho de Collins («U. S. G. Survey-Water Research Branch», Maio 1939), baseado em observações efectuadas em Coon Creek (Wisconsin), mostra que, fazendo-se uma única série de medições e multiplicando a concentração pelo caudal no mesmo instante, ter-se-ia cometido sobre o caudal sólido total anual um erro variando entre $-25\,\%$ e $+120\,\%$.

Torna-se pois necessário fazer um estudo prévio das características hidrométricas do curso de água de modo a escolher os momentos que pare-

cem mais favoráveis à colheita de amostras. O número de colheitas, no tempo, varia com o estado das águas: várias vezes ao dia durante as cheias, uma vez ao dia depois de se atingir novamente um regime mais ou menos permanente.

Geralmente escolhe-se uma vertical de medida a meio do rio. Outras vezes 3 verticais a 1/4, 1/2 e 3/4 de largura do leito; ou 1/6, 1/2 e 5/6 da mesma largura. A escolha dos pontos em cada vertical é também até agora empírica: 1 ponto à superfície ou em profundidade; 3 pontos: um à superfície, outro a meio, outro próximo do fundo, por exemplo.

Multiplicando a concentração nos vários pontos pela velocidade nesse ponto e integrando em relação a toda a secção, temos o valor médio do caudal sólido em suspensão, correspondente a uma determinada série de observações relacionada com um estado das condições do rio. Torna-se necessário obter este valor para vários estados a fim de que, por integração ao longo do tempo, seja possível determinar o volume total transportado.

A fim de evitar que as observações sejam extremamente caras, torna-se indispensável fazer um estudo prévio da distribuição de concentração de modo a determinar-se um ponto ou dois que sejam característicos do estado de suspensão e nos quais se farão habitualmente as medições, estudando ao mesmo tempo a relação entre a concentração nesse ponto e a concentração média da secção de medida considerada. Pode também lançar-se mão de leis gerais, baseadas em considerações teóricas ou experimentais. Straub, admitindo uma lei potência para a distribuição de concentrações, o que como veremos não é exacto, dá a seguinte expressão para o caudal sólido em suspensão:

$$g_s = 3/8\ (C_{0,8} + 5/8\ C_{0,2})\ q$$

em que:

g_s — caudal sólido por metro linear.

$C_{0,8}$ e $C_{0,2}$ concentração respectivamente a 0,8 e 0,2 da altura a contar do fundo.

q — caudal líquido por metro linear.

A validade de generalização desta fórmula é muito discutível, devendo utilizar-se sempre com grandes reservas. Adiante se apresentarão outras leis de concentração, baseadas no estudo teórico e experimental do fenómeno, em condições simples: canais rectilíneos de secção rectangular. No entanto a sua aplicação a casos práticos sem as devidas precauções pode dar igualmente origem a erros consideráveis.

Em vista dos erros que se podem cometer por falta de observações, e atendendo à necessidade de observações em período de águas crescentes, o que acarretaria a manutenção de uma equipe de medição em estado de prevenção durante vários meses, construiram-se aparelhos que permitem fazer uma medição contínua de concentrações e efectuar automàticamente a determinação do caudal sólido que passa em cada dia na secção de medida.

A realização está longe de ser perfeita, havendo necessidade de aceitar um certo número de causas de erro em benefício da continuidade e automaticidade de medidas. Uma análise criteriosa das condições locais poderá compensar consideràvelmente as causas do erro existentes ([1]).

V — *Medição Global do Caudal Sólido*

A deficiência dos métodos anteriormente indicados para avaliar o caudal sólido conduziu a estudos sistemáticos sobre o assoreamento de albufeiras existentes, de modo a poder determinar a quantidade total do material sólido transportado para elas.

Este processo permite fazer, por comparação, uma estimativa do material transportado por outros cursos de água. É necessário ponderar criteriosamente as características geológicas e as condições de erosão das bacias que se querem comparar.

Neste intuito criaram-se estações de medida e técnicas especiais de condução das observações. É interessante citar o exemplo francês, na estação de medição de Sautet ([2]).

As estações de medida são sobretudo um ponto óptimo para o estudo das correntes de densidade — massas de água turva que, como verdadeira corrente atravessam as águas limpas da albufeira sem com elas se misturarem. Com

---

([1]) Uma descrição pormenorizada dum aparelho com esta finalidade, bem como a discussão dos erros possíveis, pode ser vista em: Braudeau — «Quelques Techniques pour l'Étude et la Mesure du Débit Solide» — La Houille Blanche, n.º A, 1951.

([2]) A. Nizery — «La Station du Sautet pour l'Étude de l'Alluvionnement des Reservoirs» — «2ème Journées de L'Hydraulique». Junho, 1952.

efeito o estudo em Laboratório deste fenómeno oferece certas dificuldades de semelhança e sobretudo de realização para grandes valores do número de Reynolds.

Esquemàticamente, o assoreamento de uma albufeira faz-se por um lado a partir da progressão de um delta de materiais grosseiros, transportados por arrastamento; por outro lado pela decantação na parte mais profunda, e devido a uma diminuição de velocidade, dos materiais finos transportados em suspensão. Estes materiais finos assim depositados sofrem um processo natural de consolidação de tal modo que, as próprias descargas de fundo podem ser obstruídas se permanecerem muito tempo sem funcionar, a seguir a uma grande deposição.

A medição das quantidades transportadas faz-se por cubatura, sendo os elementos necessários obtidos a partir de sondagens.

Duma maneira geral há necessidade de fazer observações sobre a evolução do regolfo sólido a montante da albufeira; sobre o avanço dos materiais grosseiros na própria albufeira; sobre o transporte sólido em suspensão através das águas calmas (estudo das correntes de densidade); eventualmente sobre o efeito de descargas de material arrastado; e finalmente sobre a evolução dos depósitos a jusante.

A observação de 43 reservatórios nos Estados Unidos, conduziu à seguinte fórmula para valor total dos materiais transportados por arrastamento e em suspensão:

$$S = 0{,}0072\ C + 0{,}915\ A + 55{,}8$$

em que:

S — Depósito anual em m^3

C — Capacidade de retenção em m^3

A — Superfície da bacia em ha

É evidente que esta fórmula, como tantas outras, só é válida para condições geográficas, geológicas e de vegetação muito semelhantes àquelas para as quais foi deduzida.

Põe-se em evidência mais uma vez a necessidade de começar imediatamente a observação das albufeiras nacionais, juntando os nossos esforços aos de outros países, no sentido de alcançar um melhor conhecimento destes assuntos.

B — Leis do transporte sólido por arrastamento

I — *Força crítica de arrastamento*

Considere-se um canal de largura infinita, na qual se escoa um certo caudal em regime uniforme; a força de tracção que se exerce sobre o fundo por unidade de superfície é a componente, na direcção do escoamento, do peso do cilindro de água de geratrizes verticais e com a directriz apoiada no contorno da unidade de superfície considerada.

O peso desta água é γ H sendo γ o peso específico e H a altura, acima da unidade de superfície considerada.

A componente na direcção de escoamento obtém-se multiplicando este peso pela inclinação do fundo, *i*. Teremos assim para força de tracção sobre o fundo τ, o valor

$$\tau = \gamma H i$$

Para γ expresso em kgm^{-3}, e H expresso em m, vem τ expresso em kgm^{-2}.

Na hipótese verificada na prática de canais de largura não infinita e de secção diferente da rectangular, como por exemplo de secção trapezoidal, a distribuição da força de tracção não é uniforme, embora no fundo, a meio da secção, se avizinhe bastante do valor dado anteriormente. Analisar-se-á mais pormenorizadamente este assunto, quando se tratar do estudo da estabilidade dos canais.

Conhecida a força de tracção sobre o fundo, e considerando um determinado material constitutivo do leito, põe-se a questão de saber qual a força de arrastamento (função unívoca da altura e esta por sua vez, função unívoca do caudal, na hipótese formulada) que origina o início do movimento dos grãos. A esta força, característica do material, chama-se força crítica de arrastamento e será representada por τ_0.

No esclarecimento destes conceitos, a primeira dificuldade aparece na definição de início de arrastamento. Com efeito, não há distinção nítida entre o «repouso absoluto» e o início do movimento, tal como geralmente é este último considerado, visto que existem zonas em que se notam movimentos de materiais, mais ou menos acentuados, antes que todo o leito entre em movimento.

Há tentativas de estabelecer uma definição quantitativa do início do movimento; assim poderá supor-se que este se dá quando se verifica o arrastamento de determinada quantidade de material. No Laboratório de Vicksburg, em 1936, fixou-se esta quantidade em 1 libra (peso seco) por pé de largura de fundo e por hora. (Cerca de 1,5 kg por metro de largura e por hora).

Esta concepção embora constitua, em princípio, um progresso no sentido da uniformização dos conceitos, está baseado no entanto numa quantidade mínima carreada, de definição absolutamente arbitrária [1].

É esta dificuldade que ocasiona, em grande parte, certas divergências entre as várias fórmulas apresentadas por diversos autores.

Segundo Shields, a força de tracção crítica τ_0 é função de R_{e*}, assim definida:

Para $R_{e*} < 2 \rightarrow \dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d} = \dfrac{0{,}1}{R_{e*}}$ (τ_0 independente de d)

Para $2 < R_{e*} < 10 \rightarrow \dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d} = 0{,}03$

Para $10 < R_{e*} < 1.000 \rightarrow \dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d} =$ Valor crescendo de 0,03 a 0,06

Para $R_{e*} > 1.000 \rightarrow \dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d} = 0{,}06$

τ_0 = força crítica de arrastamento

γ_1 = peso específico dos materiais

γ = peso específico da água

$R_{e*} = \dfrac{U_* d}{\nu}$ = número de Reynolds referido à velocidade de atrito

$U_* = \sqrt{\dfrac{\tau_0}{\rho}}$ = velocidade de atrito

ρ = massa específica da água.

Segundo White, chamando φ ao ângulo do talude natural do material com a vertical, são válidas as seguintes fórmulas:

Para regime laminar: $\tau_0 = 0{,}18\ (\gamma_1 - \gamma)\, d\ \mathrm{tg}\,\varphi$

Para regime turbulento com $R_{e*} < 3{,}5$:

$$\tau_0 = \frac{0{,}18\ (\gamma_1 - \gamma)\ d\ \mathrm{tg}\,\varphi}{4}$$

Tison [1] observou, para pequenos valores de R_{e*}, ligeiro afastamento dos valores dados por Shields ou por White.

Não nos deteremos mais sobre este assunto. Com efeito a aplicação de qualquer destas fórmulas em trabalhos técnicos de engenharia parece ainda pouco viável, já pela pequena gama de valores cobertos pelos ensaios que os originaram, já por se referirem a materiais com granulometria homogénea, o que não sucede na natureza.

Adiante se darão indicações de ordem prática, para a fixação de τ_0.

II — *Caudal sólido transportado por arrastamento*

Apresentaram-se, na alínea anterior, algumas das fórmulas de determinação da força crítica de arrastamento. Pretendemos nesta alínea indicar as várias tentativas da obtenção de fórmulas que permitam a determinação da totalidade do caudal sólido carreado.

Têm sido dois os caminhos seguidos: obtenção de fórmulas baseadas em considerações teóricas; obtenção de fórmulas absolutamente empíricas.

A mais antiga de todas as fórmulas apresentadas é a de Du Bois segundo a qual

$$q_s = C_s\ \tau\ (\tau - \tau_0)$$

em que

q_s — é o caudal sólido do material por unidade de área e de tempo.

C_s — parâmetro função do material.

τ — força de arrastamento exercida sobre o fundo, igual a γHi em canais de largura indefinida e com regime uniforme, como já atrás foi indicado.

---

[1] Nizery — «Note sur l'Entraînement des Matériaux par Charriage» — «La Houille Blanche», n.º A, 1949.

[1] Tison — «Transport des Matériaux de Fond» — AIRTH — 1948.

τ_0 — força de tracção correspondente ao início do movimento, estudada no parágrafo anterior.

A validade desta fórmula que pode ser considerada, em princípio, correcta, depende essêncialmente do conhecimento de C_s. As medições até agora realizadas para determinação de C_s não são em número suficiente para permitirem uma fixação criteriosa do seu valor para cada caso.

É no entanto interessante notar que grande número de fórmulas, tanto de índole teórica, como empírica, se podem apresentar com um aspecto formalmente idêntico ao da fórmula de Du Bois.

Para não nos alongarmos exageradamente, registamos, como fórmulas de índole teórica, as de Einstein e de Kalinske ([1]).

De todas as fórmulas experimentais merecem um lugar especial as de Meyer-Peter, cujas experiências em Zürich, constituem, no seu conjunto um trabalho verdadeiramente notável ([2]).

Nestas experiências procurou-se sempre que o regime fosse uniforme, o que nem sempre se conseguiu.

Quanto aos materiais foram inicialmente utilizados grãos uniformes de areia, cujo peso específico era de $\gamma = 2{,}68\ Tm^{-3}$. Depois foram empregados materiais de peso específico diferente, como barita ($\gamma = 4{,}2\ Tm^{-3}$) e linhite ($\gamma = 1{,}252\ Tm^{-3}$).

Finalmente utilizaram-se misturas de materiais de várias granulometrias tanto quanto possível semelhantes às encontradas na natureza.

O conjunto dos ensaios cobriu a seguinte variação de valores:

Inclinações i: 0,4 a 20 %
Profundidade de água H: 1 a 120 cm
Caudal Q: 0,002 a 2 $m^3\ seg^{-1}\ m^{-1}$.
Peso específico dos materiais dentro de água: γ''_s: 0,25 a 3,2 T/m^3.

A fim de evitar o efeito da parede do canal, reduzindo as observações na medida do possível às condições de canal de largura indefinida e tornando assim comparáveis os resultados obtidos em canais diferentes, procurou-se determinar qual o caudal cuja energia influia de facto no movimento do fundo; deduziu-se, para isso, do caudal total, a parcela de caudal cuja energia seja equivalente à energia gasta por atrito, nas paredes do canal.

Para materiais de grãos de diâmetro uniforme, foi deduzida a seguinte fórmula, em unidades métricas

$$\frac{q^{2/3}\ i}{d} = 17 + 0{,}547\ \frac{g''^{\,2/3}_s}{d}$$

em que:

q — caudal por unidade de largura ($m^2\ seg^{-1}$)
i — perda de energia por unidade de comprimento do canal
g''_s — peso do material transportado por unidade de largura e por segundo, pesado dentro de água (T_m^{-3})
d — diâmetro das partículas (m).

O início do movimento dá-se para $g''_s = 0$ consequentemente para

$$\frac{q^{2/3}\ i}{d} = 17$$

Note-se que se for γ_s o peso específico real (peso específico do grão, sem vasios) do material fora de água, o peso específico γ''_s do mesmo material dentro de água será $\gamma''_s = \gamma_s - 1$ (T_m^{-3}).

Uma nova série de ensaios permitiu deduzir outra fórmula, aplicável a misturas e fazendo intervir o peso específico dos materiais.

Desta maneira aproxima-se mais das condições encontradas na natureza.

A fórmula foi apresentada com o seguinte aspecto, em unidades métricas

$$\gamma_a \left(\frac{Ks}{Kr}\right)^{3/2} . R . i = 0{,}047\ \gamma''_s . dm + 0{,}25 \left(\frac{\gamma_a}{g}\right)^{1/3} . g''^{\,2/3}_s$$

em que:

γ_a — peso específico da água (Tm^{-3})
K_r = coeficiente de rugosidade de Strikler correspondente só aos materiais. (Para o regime turbulento é $K_r = \frac{21}{d_m^{1/6}}$, aproximadamente)
K_s — coeficiente de rugosidade de Strikler, correspondente à rugosidade do conjunto ($m^{-1/6}$)
R — Raio hidráulico (m)

([1]) Rouse — «Engineering Hydraulics», 1949, págs. 796 a 799.

([2]) Meyer-Peter and Müller — «Form ulas for Bed Load Transport» — AIRTH — 1948.

i — perda de energia por unidade de comprimento do canal

γ''_s — peso específico do material dentro de água (Tm^{-3})

$d_m = \frac{\Sigma d \Delta p}{100}$ diâmetro médio (m) (ordenada média da curva de composição granulométrica)

g — aceleração da gravidade ($m\ seg^{-2}$)

g''_s — peso do material transportado por unidade de largura e por segundo, pesado dentro de água ($Tm^{-1}\ seg^{-1}$).

Tal como no caso anterior o início do transporte é definido por $g''_s = 0$, isto é por

$$\gamma_a \cdot \left(\frac{Ks}{Kr}\right)^{3/2} R.\ i = 0{,}047\ \gamma''_s \cdot dm$$

É aconselhável neste caso substituir o coeficiente 0,047 por 0,03.

A aplicação destas fórmulas aos casos naturais oferece certas dificuldades. Com efeito, além de se supor uma secção rectangular, deve também admitir-se que todo o material entra em movimento, de tal modo que a granulometria do material transportado seja igual à do material constitutivo do fundo.

Isto, porém, nem sempre sucede na natureza. Assim supondo uma sucessão de caudais crescentes, existirá inicialmente um valor Q_0 a que corresponde uma altura de água H_0 e uma força no fundo τ_0, que marcam o início do movimento do material do fundo, o qual começará pelos elementos de menor diâmetro.

Só aumentando o caudal, é que ocorrerá um valor Q, a que corresponde uma força de tracção sobre o fundo τ_1, a partir da qual todo o material se põe em movimento, de tal modo que os materiais transportados terão uma granulometria igual à dos materiais do fundo.

Na gama de caudais compreendidos entre Q_0 e Q, será difícil aplicar as leis anteriores, visto que não se sabe, «à priori», a granulometria do material transportado. A partir de estudos feitos em modelo reduzido A. Nizery e G. Braudeau (1) aconselham a seguinte maneira de proceder, aplicável a secções não rectangulares e a movimento do fundo não completamente desenvolvido.

(1) A. Nizery e G. Braudeau — «Variation de La Granulometrie de Charriage dans une Section de Rivière» — A I R H — 1953.

Divide-se a secção em troços verticais representados genèricamente pelo índice K; a altura de água em cada troço será representada por h_K.

Em cada um desses troços será transportado um caudal sólido g_K com um diâmetro médio da mistura d_K.

Em cada troço supõe-se que a força de arrastamento sobre o fundo é:

$$\tau_K = \gamma\, i\, h_K$$

O caudal transportado, em cada troço, parece ser dado pela expresão

$$g_K = 7{,}3 \times 10^4\ (d_K^{1/4} - do^{1/4})^1\ (\tau_K - \tau_0)^{7/2}$$

em que

$d_K = 17{,}7 \times 10^3\ \tau_K^4$

$do = 17{,}7 \times 10^3\ \tau_0^4$

τ_0 = força de arrastamento correspondente ao início do movimento.

O caudal total transportado será:

$$G = \Sigma\ g_K$$

Na própria expressão dos autores estas fórmulas só representam uma tentativa de solução do problema, havendo ainda um longo caminho para se atingirem as verdadeiras leis que regem o fenómeno na natureza.

C — Leis do transporte sólido por suspensão

I — *Mecanismo da Suspensão*

Várias têm sido as teorias que procuram explicar teòricamente o fenómeno da suspensão.

Uma, bastante generalizada, devida em grande parte a Flamant e actualmente abandonada, estudava o fenómeno da suspensão a partir do gradiante de velocidades $\frac{dv}{dn}$, ao longo duma vertical. Outra aborda o problema a partir do teorema da sustentação de Kutta-Joukowsky (1).

As actuais teorias, a partir das quais se conseguiram algumas indicações susceptíveis de aplicação prática, afastam-se completamente desta maneira de interpretar os factos e baseiam-se

(1) Scimeni — «Compêndio de Hidráulica» — Pádova 1938, pág. 171.

fundamentalmente no fenómeno da turbulência com o qual consideram ìntimamente ligado o fenómeno da suspensão.

São sobejamente conhecidas as experiências de Reynolds em condutas mostrando a existência de dois tipos de escoamentos distintos na sua natureza e nas leis que os regem: o escoamento laminar e o escoamento turbulento ([1]). A passagem de um regime a outro dá-se para determinado valor do número de Reynolds, aproximadamente igual a 2.400 para condutas circulares, tomando para parâmetro linear o diâmetro.

Note-se que o valor do número de Reynolds a partir do qual o movimento é nìtidamente turbulento, é função da rugosidade relativa das paredes. O diagrama de Nikuradse, para rugosidades uniformes, e o diagrama de Moody, para condutas industriais, mostram bem este facto.

Fenómeno análogo se verifica nos escoamentos em superfície livre embora, do ponto de vista quantitativo, não esteja ainda também analisado.

Não nos deteremos sobre este assunto, limitando-nos a recordar o mecanismo interno do movimento turbulento, de modo a tornar mais claro o mecanismo da suspensão.

Seguindo Bakhmeteff, a melhor maneira de representar a turbulência consiste em sobrepor ao escoamento de base que transporta um determinado caudal total regular, uma infinidade de movimentos secundários que, sob a forma de turbilhões, por exemplo, aparecem em vários pontos do escoamento e não obedecem a qualquer lei aparente.

Estes movimentos secundários originam uma variação permanente dos valores das velocidades pontuais. São no entanto diferentes dos movimentos intermoleculares infinitesimais e de alta frequência, considerados na teoria cinética dos gases, em relação aos quais os aparelhos de medida se mostram incapazes de registar as flutuações, limitando-se a indicar valores médios.

Pelo contrário, no caso de escoamentos turbulentos em grandes dimensões, como os que se observam em cursos de água, é fácil distinguir as variações de velocidades locais. Na fig. 2, reproduz-se uma curva experimental de variação de velocidade com o tempo, observando-se afastamentos do valor médio da ordem dos 45 %.

([1]) Veja-se A. Bakhmeteff — «Mécanique de l'Écoulement Turbulent des Fluides» — Paris, 1954.

As perdas de carga num regime turbulento são maiores do que num regime laminar, isto é, a turbulência provoca forças tangenciais bastante superiores.

As forças tangenciais que se exercem entre os diferentes filetes do movimento turbulento são devidas a uma troca contínua de partículas entre camadas vizinhas, havendo portanto um intercâmbio de quantidades de movimento que tende a uniformizar mais a distribuição de velocidades médias pontuais, opondo-se assim ao efeito da viscosidade.

Na hipótese de movimento laminar, a força tangencial por unidade de superfície é, de acordo com a definição de viscosidade

$$t = \mu \frac{dv}{dn}$$

t, representa a tensão tangencial, μ a viscosidade molecular, e $\frac{dv}{dn}$ o gradiante de velocidades

Na hipótese de movimento turbulento, a velocidade instantânea v, num ponto, será a soma de duas parcelas: a velocidade média no tempo $\bar{v}$, e a variação momentânea v' isto é:

$$v = \bar{v} + v'$$

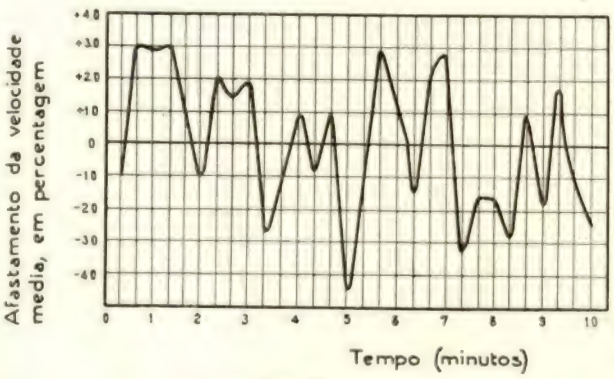


Fig. 2

Para exprimir a força tangencial, introduz-se um novo conceito de viscosidade, denominada a viscosidade de turbulência n, que depende essencialmente da forma dos turbilhões ([1]).

Ao passo que a viscosidade molecular é a mesma em todos os pontos dum fluído homogéneo, a viscosidade de turbulência varia de ponto

([1]) Rouse — «Engineering Hydraulics» pg. 89.

para ponto só podendo ser prevista a partir das características da turbulência.

Teremos pois, como valor médio no tempo da força tangencial $t = (\mu + \eta) \frac{d\bar{v}}{dn}$

Por analogia com a noção de viscosidade cinemática molecular

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

chama-se viscosidade cinemática de turbulência, à relação

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\rho}$$

em que ρ representa a massa específica do líquido.

A troca de fluído entre duas zonas vizinhas, como sucede no movimento turbulento, implica necessàriamente um intercâmbio das características locais do fluido; por exemplo, o líquido transportado duma camada de velocidade média inferior, para outra de velocidade média mais elevada, acarretará o aumento de velocidade da primeira camada e uma diminuição de velocidade da segunda.

A relação de aumento ou diminuição depende fundamentalmente de duas variáveis independentes: a capacidade de transporte de zona para zona, e a diferença das características nas duas zonas.

Assim, poderemos escrever a equação geral

$$N = -D \frac{dc}{dn}$$

em que *N* representa a intensidade do transporte lateral das características do fluido, *D* o coeficiente de difusão e c a intensidade característica do fenómeno ou concentração. O sinal negativo indica que o transporte se verifica invariàvelmente na direcção das concentrações menores.

De acordo com o atrás exposto são as viscosidades moleculares ou de turbulência que determinam as trocas entre as diferentes camadas.

Assim, se o escoamento é laminar, *D* será proporcional a μ. Se for nìtidamente turbulento, D é proporcional a η; se estiver na zona de passagem do laminar ao turbulento, *D* é proporcional a μ e a η.

Se a característica representada duma maneira geral por N é a relação de transporte lateral da matéria em suspensão, que representaremos por M, temos, representando por *c* a concentração local, as duas hipóteses.

No movimento laminar

$$M \text{ lam.} = -\beta \nu \frac{dc}{dn}$$

No movimento turbulento

$$M \text{ turb.} = -\beta \varepsilon \frac{dc}{dn}$$

em que β é um coeficiente de proporcionalidade. Os valores absolutos destes coeficientes não estão ainda bem determinados.

Analisado o mecanismo da turbulência e as leis que regem os fenómenos da difusão, consideremos um escoamento em que se verifica o regime turbulento na qual existe determinada quantidade de partículas em suspensão. Pelo seu próprio peso aparente (supomos as partículas de peso específico superior ao da água) estas partículas tendem a descer.

Assim, uma determinada camada apresentará uma concentração (quantidade de matéria suspensa contida na unidade de volume) maior do que a das camadas superiores. Por outro lado as trocas devidas a turbulência, terão tendência para uniformizar as concentrações. (Sinal negativo do coeficiente D).

É fácil portanto conceber um equilíbrio entre as duas tendências inversas, explicando-se desta maneira o mecanismo de manutenção da suspensão.

Como se viu, a relação entre o transporte lateral, devido à turbulência, seguia a lei

$$M = -\beta \varepsilon \frac{dc}{dn}$$

Por outro lado o mesmo transporte lateral, por efeito do peso das partículas é

$$M = cw$$

sendo *w* a velocidade de queda.

Logo que se atinge o equilíbrio vem

$$cw = -\beta \varepsilon \frac{dc}{dn}$$

Admitindo que o coeficiente de mistura para o material suspenso é o mesmo do escoamento, por efeito da turbulência, será $\beta = 1$, e

$$cw = -\varepsilon \frac{dc}{dn}$$

Considerando ε independente da elevação n, pode-se integrar esta equação, que conduz, a

$$\frac{c}{c_a} = e^{-\frac{W(z-a)}{\varepsilon}}$$

sendo c_a a concentração num dado ponto colocado à altura *a*.

Admitindo a relação de Prandtl para o coeficiente de mistura, e a relação de Prandtl-Karman para a distribuição de velocidades (1) obtemos a equação

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{z-a}{h-a}\right)^{2,5 \frac{W}{\sqrt{\tau/\rho}}}$$

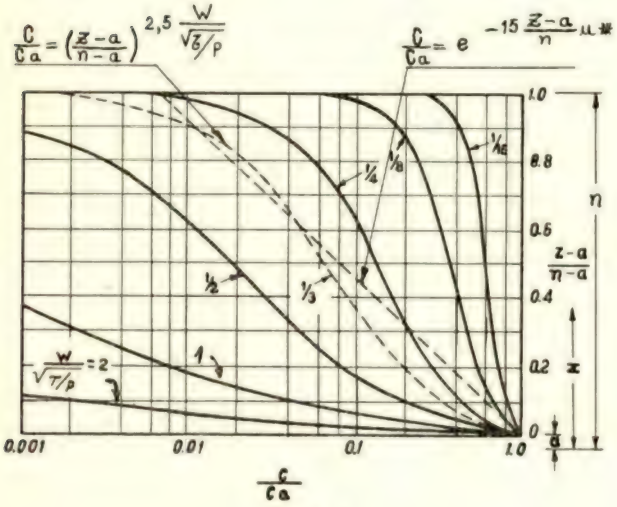


Fig. 3

Esta equação assim representada, é conhecida pelo nome de Lei de Rouse.

A relação

$$\frac{W}{\sqrt{\tau/\rho}} = \frac{W}{U_*}$$

em que $U_* = \sqrt{\tau/\rho}$, é a velocidade de atrito, é um parâmetro sem dimensões que caracteriza o andamento das curvas de concentração (fig. 3) e ao qual se dá o nome de Número de Rouse.

(1) Rouse - «Engineering Hydraulics» - 1949 - pg. 800.

A relação entre a velocidade média e a velocidade de atrito é, em função do coeficiente de Chezy χ (1):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{\chi}{\sqrt{g}}$$

Lane e Kalinske, tomam para ε o seu valor médio, sendo conduzidos à nova equação

$$\frac{c}{c_a} = e^{-15 \frac{z-a}{n} U_*}$$

Na fig. 3, apresentam-se a tracejado a curva de Rouse e a curva de Kalinske correspondente.

Embora estas equações sejam um grande avanço na análise matemática do mecanismo da suspensão, não resolvem de modo algum o problema duma maneira completa nem perfeita. Experiências de Vanoni (2) mostram que há diferenças sensíveis entre as características de mistura do fluido e as do sedimento. As equações anteriores seriam válidas tomando para ε um valor diferente do correspondente ao mecanismo da suspensão.

II — *Caudal sólido transportado por suspensão*

O caudal sólido transportado por suspensão, uma vez conhecida a lei de distribuição de velocidades e de concentrações obter-se-ia a partir do integral

$$q_s = \int_0^n v\,c\,d\,z$$

Este integral é difícil de calcular. Existem ábacos que facilitam o seu cálculo, supondo que as concentrações seguem a lei de Kalinske. A aplicação destas fórmulas no domínio da técnica não parece ainda fácil e sobretudo não parece que, no estado actual do problema, possa conduzir a resultados dignos de confiança.

Com efeito, as equações anteriores pressupõem:

— um escoamento uniforme a duas dimensões;
— mecanismo da turbulência semelhante em toda a secção donde a necessidade de excluir o fundo e a superfície;

(1) Danel — «Charriage en Suspension», AIRTH — 1948.

(2) Vanoni — «Transportation Suspended Sediment by Water» — Proceeding ASCE, June 1944.

— coeficiente de mistura igual para o líquido e para a matéria em suspensão o que vai contra as observações de Vanoni;
— não perturbação do escoamento pela presença dos materiais;
— concentração fraca de modo a não variar o peso específico da mistura;
— repartição exponencial de velocidades, segundo Kalinske.

Também neste capítulo é ainda longo o caminho a andar para se atingir um conhecimento mais perfeito das leis que regem o fenómeno da suspensão.

D — Estudo da Estabilidade de Canais

I — *Generalidades*

Chama-se «canal estável» aquele em que não se observam nem escavações nem depósitos importantes.

A estabilidade pode ser instantânea, ou média no tempo, isto é, referida a um ciclo de acontecimentos. Chama-se «canal em regime» a um canal estável transportando por arrastamento um determinado caudal sólido em regime, isto é, um caudal sólido que origina um leito móvel em toda a sua extensão (1).

Assim, um canal não é estável sempre que:

— o leito ou as margens estão sujeitas a erosões sem formação de depósitos;
— há zonas de formação de depósitos sem erosões;
— há depósitos em determinadas zonas e erosões noutras zonas.

Um dos caminhos, certamente fecundo, para o estudo da estabilidade de um canal, entronca-se na teoria do transporte sólido por arrastamento e por suspensão: este caminho, de índole analítica, isto é, com tendência a separar os diferentes fenómenos que entram em jogo, oferece certas dificuldades devidas sobretudo ao insuficiente conhecimento das leis que regem esses fenómenos. Outro caminho, que parece ser igualmente fecundo, parte de considerações físicas e de semelhança e encara o fenómeno duma maneira sintética, isto é, global: teoria de Lacey.

II — *Estudo a partir da teoria do transporte sólido*

a) Canais com águas claras

Sempre que não se verificam depósitos, isto é, em canais com águas claras ou transportando poucos sedimentos, a instabilidade do canal pode ser estudada ùnicamente a partir da análise das forças de arrastamento e da sua distribuição.

Considerando um canal em que se escoam águas sem material em suspensão, e cujas paredes são constituídas por elementos sem coesão, as forças que actuam sobre as partículas são a força de arrastamento, devida ao movimento da água, e a componente da força de gravidade na direcção da inclinação.

Vários têm sido os estudos teóricos que procuram estabelecer, para cada material, qual o perfil de secção transversal que corresponderia a um perfil de equilíbrio para determinada inclinação longitudinal e para determinado caudal: Koekhlin, Ibad-Zade, e estudos recentes, ainda não publicados, levados a efeito no «Laboratoire National d'Hydraulique», em Chatou.

Todos estes estudos pressupõem granulometrias uniformes, não estando por isso ainda aptos a darem indicações para o domínio das aplicações técnicas.

No domínio da técnica tem havido várias indicações de cálculo baseadas no conceito de velocidade crítica de arrastamento dos materiais; parece, no entanto, que este conceito é substituído com vantagens pelo conceito de força crítica de arrastamento. Com efeito, numerosas observações mostram que, para os mesmos materiais no leito e nas margens, os canais de pequena secção começam a ser atacados para velocidades médias menores do que os canais geomètricamente semelhantes, mas de secção maior. A velocidade crítica é, consequentemente, função não só dos materiais, mas também das dimensões do canal.

Resulta deste facto que a tendência actual é lançar mão do conceito de força crítica de arrastamento.

Já se viu que num canal de largura infinita a força exercida pela água por unidade de superfície do fundo é $\tau = \gamma Hi$.

(1) Lacey — «General Theory of Flow in Alluvium» — «Journal of the Institution of Civil Engineers», November 1946.

No entanto nos canais usualmente empregados em engenharia, tais como os de secção trapezoidal, a força de arrastamento não é uniformemente distribuída ao longo do fundo e das margens.

Parece, porém, ser lícito admitir, de acordo com as experiências até agora realizadas, que em todos os canais geomètricamente semelhantes, haverá uma distribuição semelhante das forças de arrastamento exercidas pela água, de tal modo que conhecendo a lei de distribuição das forças de arrastamento num canal, conhecemos também a distribuição das mesmas forças em todos os canais semelhantes.

Na fig. 4 mostra-se a distribuição das forças de arrastamento no fundo e nos lados de canais trapezoidais. A tabela I dá os valores de $\tau_1/\gamma Hi$, e $\tau_2/\gamma Hi$ isto é, os valores da força de arrastamento máxima nos lados e no fundo expressa em γHi. A força de arrastamento máxima no fundo ocorre sempre a meio. A força máxima de arrastamento ocorre a uma distância d do fundo, dada também pela tabela I, expressa em H. A tabela II dá indicações semelhantes em secções triangulares (1).

TABELA I

Forças máximas de arrastamento nos lados e nos fundos de secções trapezoidais

(Ver fig. 4)

m →	2			1,5			0 (Rectangular)		
L/H ↓	$\tau_1/\gamma Hi = k_1$	$\tau_2/\gamma Hi = k_2$	d_1/H	$\tau_1/\gamma Hi$	$\tau_2/\gamma Hi$	d_1/H	$\tau_1/\gamma Hi$	$\tau_2/\gamma Hi$	d_1/H
0 *	0,650	0	0,3	0,565	0	0,3	0	0	—
1	0,730	0,780		0,695	0,780		0,468	0,372	1,0
2	0,760	0,890	0,2	0,735	0,890	0,2	0,686	0,686	1,0
3	0,765	0,940		0,743	0,940		0,740	0,870	1,0
4	0,770	0,970	0,2	0,750	0,970	0,3 (?)	0,744	0,936	1,0
6	0,770	0,980		0,755	0,980				
8	0,770	0,990	0,2	0,760	0,990	0,2			

* Secção triangular.

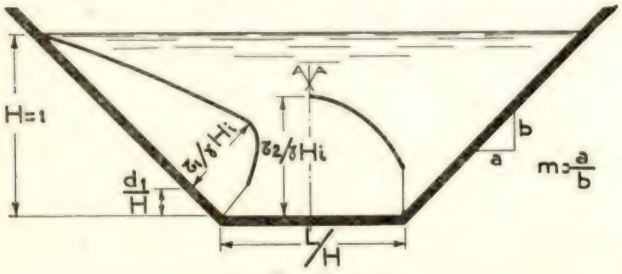


Fig. 4

Conhecida a distribuição de força de arrastamento resta estudar as forças críticas de arrastamento dos materiais; o conhecimento das forças exercidas e das forças críticas de arrastamento suportadas permite-nos ajuizar do comportamento de determinada secção quando nela se escoa determinado caudal com determinada altura de água.

Já anteriormente se abordou a maneira de determinar a força crítica de arrastamento. As fórmulas existentes (Shields, White, e outras) não são, por enquanto utilizáveis no domínio técnico.

Dão-se, por isso a seguir algumas indicações de carácter prático, que resumem os conhecimentos obtidos até agora.

Numerosas medições efectuadas no canal de «San Luis Valley» na América, parece permitirem concluir que no caso de materiais grosseiros não coerentes, a força crítica de arrastamento em kgm^{-2} se expressa pelo mesmo número que o diâmetro dos materiais, em centímetros, ao qual, na curva de composição granulométrica, correspondem 75 % de materiais com diâmetro inferior, e que se representará por d_{75}. Será então

$$\tau_0\ (kgm^{-2}) = d_{75}\ (cm)$$

(1) Lane — «Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by the Bureau of Reclamation» — Proceedings A. S. C. E. — Volume 79 — Separata 280, pág. 26.

TABELA II

Forças máximas de arrastamento em secções triangulares

(Ver fig. 4 supondo L = 0)

m	3	1,5	1	0,667	0,5
$\tau_1/\gamma Hi$	0,650	0,565	0,480	0,375	0,325
d_1/H	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7

Como norma de cálculo aconselha-se antes a seguinte relação

$$\tau_0 \ (kgm^{-2}) = 0{,}8 \ d_{75} \ (cm)$$

Esta relação é aplicável para materiais de peso específico igual a 2,56 T/m^3. Se o peso específico se afastar muito deste valor, torna-se necessário multiplicar o valor indicado pela relação entre o peso específico do novo material, considerado submerso e o peso específico do material anterior considerado também submerso. Se os grãos do material forem porosos, o peso específico considerado deve ser tal que corresponda à hipótese de os vasios se encontrarem cheios de água.

Num canal assim projectado, é natural que alguns dos elementos mais finos sejam arrastados. Se este facto for de evitar, tal como no caso de o canal alimentar uma turbina, devem tomar-se as devidas precauções.

Para os materiais que estamos tratando, constituídos por elementos grosseiros há necessidade de ter em consideração o efeito da inclinação dos lados, o qual pode ser traduzido do ponto de vista prático de dimensionamento do canal, por um factor *K* definido como a relação entre a força de tracção necessária para pôr em movimento determinado material colocado em lados inclinados, e a força de tracção crítica do mesmo material colocado num plano horizontal.

A expressão de *K* é

$$K = \cos \phi \sqrt{\frac{tg^2 \ \phi}{tg^2 \ \Theta}}$$

em que: ϕ — ângulo do lado do canal com a horizontal.

Θ — ângulo de repouso do material com a horizontal.

Na fig. 5 estão registados os valores do ângulo de repouso de algus materiais, em função do diâmetro e da natureza dos grãos.

Os valores de *k* podem ser obtidos a partir do gráfico da fig. 6.

Suponhamos então que se pretende dimensionar um canal trapezoidal em que fixamos os seguintes elementos:

L — largura de rasto do canal

H — altura de água

m — inclinação dos lados com a horizontal

d_{75} — diâmetro, extraído da curva de composição granulométrica, tal que 75 % dos materiais têm diâmetro inferior.

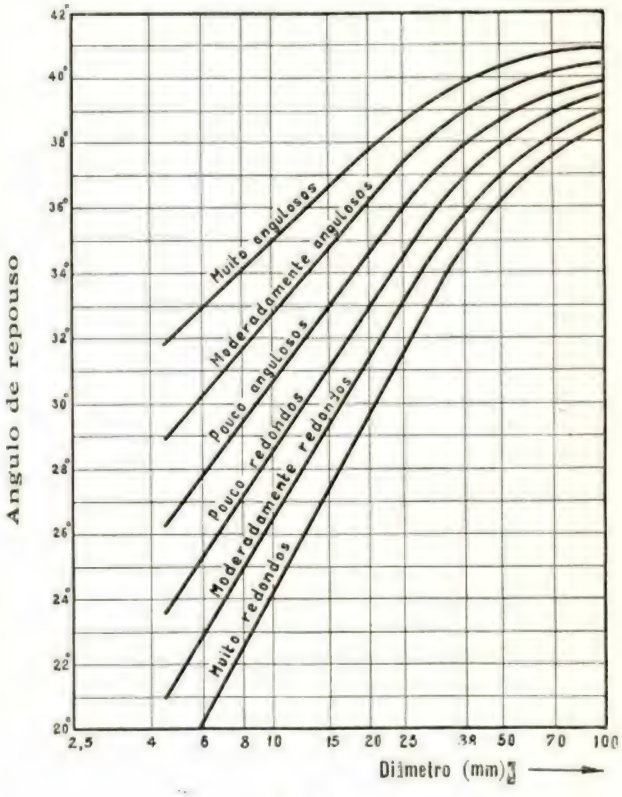


Fig. 5

Calculada a relação $\frac{L}{H}$, obtém-se da tabela I o valor de k_1 da máxima força de tracção exercida sobre o fundo, $k_2 \ \gamma$ Hi.

A máxima força permitida pelo material, com a respectiva margem de segurança, será $\tau = 0{,}8 \ d_{75}$.

Da igualdade destas duas, pode-se calcular o valor de *i*.

Esta inclinação assegura-nos a estabilidade do fundo.

Para averiguar da estabilidade dos lados procede-se da seguinte maneira: a partir do gráfico da fig. 5, vê-se o ângulo de repouso do material, e a partir do gráfico da fig. 6, o valor de k definido anteriormente o que nos permite calcular a máxima força de tracção admitida pelo material. Da tabela I tira-se a máxima força exercida pela água nos lados: $\tau = k_1 \gamma Hi$. Da igualdade destas forças obtemos um novo valor da inclinação do canal i. Deve adoptar-se como valor definitivo, o mais pequeno dos valores assim calculados.

Na hipótese de canais construídos com materiais finos não coerentes, aconselham-se para força crítica de arrastamento os indicados na tabela III ([1]).

TABELA III

Força crítica de arrastamento em kg m^{-2}, para materiais finos não coerentes

Diâmetro mediano d_{50} mm	Água clara	Água com sedimentos finos em pequena quantidade	Água com sedimentos finos em grande quantidade
	(kg m^{-2})	(kg m^{-2})	(kg m^{-2})
0,1	0,012	0,024	0,037
0,2	0,013	0,025	0,038
0,5	0,015	0,027	0,041
1,0	0,020	0,029	0,044
2,0	0,029	0,039	0,054
5,0	0,068	0,081	0,090

Segundo se deduz da tabela anterior, o facto de existirem certas quantidades de material fino em suspensão permite quase duplicar a força crítica de arrastamento, possìvelmente devido a um certo efeito de cimentação dessas partículas finas.

O diâmetro mediano corresponde ao diâmetro da curva de granulometria para o qual 50 % do material tem diâmetro inferior.

Na hipótese de canais cavados em materiais coerentes, existem ainda poucos dados seguros.

Enquanto não houver dados mais concretos podem servir de indicação os dados da tabela IV.

([1]) Lane — Obra citada — pg. 28.

TABELA IV

Força crítica de arrastamento em kg m^{-2}, para materiais coerentes

Natureza do leito / Material coerente do leito	Muito pouco compactade com uma relação de vazios de 2,0 a 1,2	Pouco compactado com uma relação de vazios de 1,2 a 0,6	Compactado com uma relação de vazios de 0,6 a 0,3	Muito campactado com uma relação de vazios de 0,3 a 0,2
Argilas arenosas (percentagem de areia inferior a 50 %)	0,020	0,077	0,160	0,308
Solos com grandes quantidades de argilas	0,015	0,069	0,149	0,275
Argilas	0,012	0,061	0,137	0,259
Argilas muito finas	0,010	0,047	0,104	0,173

O que atrás se expôs sobre a força de tracção crítica dos materiais refere-se a canais rectos ou com curvas pouco pronunciadas, características dos terrenos planos. É porém, do conhecimento geral, que um canal com curvas está mais sujeito ao efeito erosivo do que outro com desenvolvimento rectilínio.

Não se possui actualmente, em geral, grande número de observações que permitam dar indicações seguras da maneira de proceder. Dentro dos conhecimentos actuais, e a título de simples recomendação, Lane apresenta os seguintes valores: para canais com poucas curvas típicas nas zonas de topografia ligeiramente acidentada a força crítica de arrastamento é 0,90 de força crítica correspondente a canais rectilíneos; para canais com uma quantidade média de curvas que ocorrem em zonas medianamente acidentadas aquele factor passará a 0,75; e para canais com muitas curvas característicos das zonas montanhosas o seu valor será de 0,60.

b) Canais com águas que transportam grandes quantidades de sedimentos.

Neste caso haveria que estudar para cada secção típica o equilíbrio entre as quantidades de material sólido que aflui e a capacidade de transporte do canal, nessa secção. O primeiro factor seria um dado do problema; o segundo poderia ser computado a partir das fórmulas do transporte sólido por arrastamento e em suspensão.

Este esquema, aparentemente simples, oferece

dificuldades práticas na determinação dos materiais que afluem, e dificuldades de cálculo, pelo pouco conhecimento, atrás apontado, das leis que regem o transporte sólido.

sendo w a velocidade final de queda, e constitui sempre uma indicação da natureza do material do leito; o segundo é função da forma, da densidade e da quantidade de material transportado.

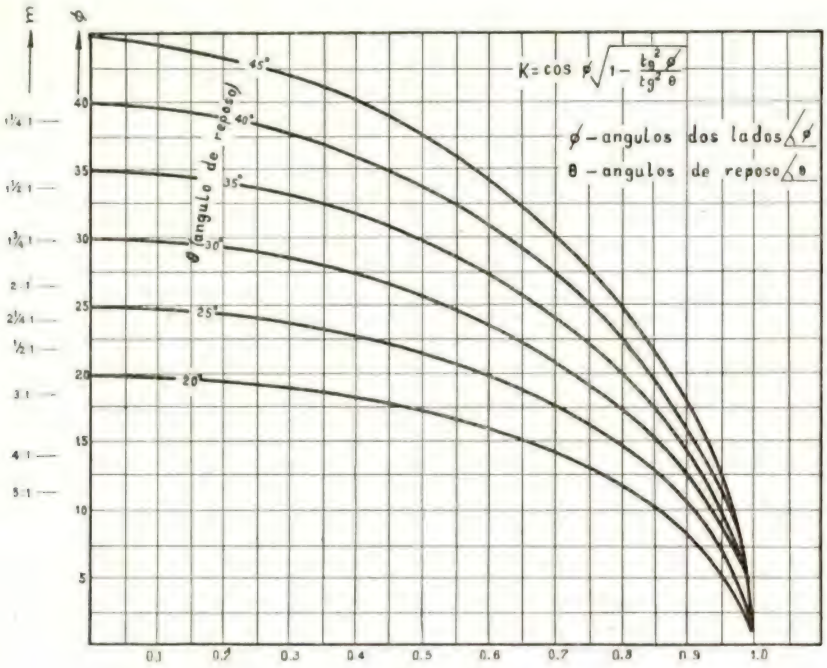


Fig. 6

Os métodos que atrás se classificaram de sintéticos e devidos sobretudo a Lacey, parece darem indicações mais seguras acerca deste problema.

III — *Teoria de Lacey*

Lacey ([1]) baseado em considerações físicas e de semelhança, e num grande número de observações em cursos de água naturais segue um caminho bastante diferente do anteriormente indicado.

Partindo de considerações de semelhança estabelece dois parâmetros básicos no estudo dos canais: (Vi) e ($R^{1/2}$ i) em que *V* é a velocidade média, *i* a inclinação, *R* o raio hidráulico.

Demonstra que o primeiro é directamente proporcional à velocidade de queda das partículas

$$Vi = Kw$$

Enquanto o primeiro traduz a acção das forças que tendem a encaminhar as partículas para o leito, o segundo indica as forças que tendem a faze-las caminhar no sentido do escoamento. Estas forças devem estar relacionadas umas com as outras, devendo consequentemente existir uma relação do tipo

$$Vi = F\ (R^{1/2}\, i)$$

A partir de observações na natureza, Lacey verificou que a equação de ligação dos dois parâmetros era, para canais em regime

$$Vi_* = 1{,}60\ (R^{1/2}\, i_*)^{1/3}$$

com i_* expressão em partes por mil, e *V* e *R* expresso em pés, por segundo e pés respectivamente.

Em unidades métricas poderá escrever-se

$$Vi_* = 1{,}07\ (R^{1/2}\, i_*)^{4/3}$$

Esta equação denomina-se equação normal.

([1]) Lacey — «A General Theory of Flow in Alluvium» — «Journal of the Institution of Civil Engineers» — November 1946.

A equação normal tem nm limite superior devido à formação do ressalto. Com efeito se a velocidade média excede $V = (gH)^{1/2}$, ou apròximadamente $(gR)^{1/2}$, entrar-se-á na zona de regime rápido. Relacionando este valor com o da equação normal, obtém-se para coordenadas do ponto limite correspondente, os valores seguintes

$$Vi_* = 253 \text{ ft sg}^{-1}$$

ou

$$Vi_* = 76 \text{ m sg}^{-1}$$

e

$$R^{1/2} i_* = 43{,}5 \text{ ft}^{1/2}$$

ou

$$R^{1/2} i_* = 24{,}2 \text{ m}^{1/2}$$

Consequentemente, sempre que o valor de Vi_* excede cerca de 75, entra-se na zona do ressalto, e do regime rápido.

No que diz respeito às dimensões do canal, Lacey indicou uma relação entre o perímetro molhado e o caudal, que em unidades métricas é:

$$P = 4{,}836\ Q^{1/2}$$

em que *P* é o perímetro molhado e *Q* o caudal.

Esta equação apresenta-se independentemente das condições do caudal sólido, traduzidas pelo produto (i_* V) na equação anterior, o que segundo a própria opinião de Lacey não deve ser completamente exacto.

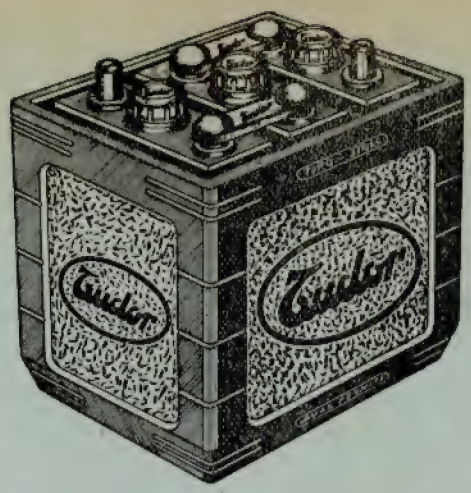
A teoria de Lacey levantou, logo de início, grandes objecções. Aplicada no entanto a vários canais e em diferentes regiões, tem conduzido a bons resultados e tem originado vários métodos de cálculo em que as constantes das fórmulas apresentadas por Lacey perdem o seu carácter absoluto e se adaptam às diversas condições locais.

Entre outros estudos indicam-se os referenciados nos n.os 12, 22, 25 e 30 da bibliografia.

BIBLIOGRAFIA

1) Allen - «Scale Models in Hydraulic Engineering».
2) Bakhemeteff — «Mécanique de L'Ecoulement Turbulent des Fluides».
3) Braudeau — «Le Turbidimètre a Double Celulle Photo-eléctrique» — Deuxième Journée de L'Hydraulique — Grenoble — 1952.
4) Braudeau — «Quelques Techniques pour l'Etude et le Mesure du Débit Solide» — «Houille Blanche» — N.º A — 1951.
5) Blench — «Hydraulics of Sediment Bearing Canals and Rivers». Evans Industries — Vancouver, 1951.
6) Carter and Carlson — «Critical Tractive Forces on Channel sid Slopes» — Hydraulic Laboratory, report n.º Hyd 295. Bureau of Reclamation.
7) Danel — «Charriage en Suspension» — AIRTH 1948.
8) Davis — «Handbook of Applied Hydraulics». — Mc Graw-Hill Book Company New York, 1952.
9) Dobbins — «Effect of Turbulence on Sedimentations». American Society of Civil Engineers Transactions. Vol. 109 — p. 629 — 1945 — or American Society of Civil Engineers Proceedings. Vol. 69, n.º 2, p. 235 — Fev. 1943.
10) Friedkin — «A Laboratory Study of Meandering of Alluvial Rivers» — Vicksburg, 1945.
11) Inglis - «Historical Note on Empirical Equations Developed by Engineers in India for Flow of Water and Sand in Alluvial Channels» — AIRTH, 1948.
12) Ishak — das — «Design of Lined Canals» — AIRTH, 1953.
13) Johson — «Laboratory Investigations on Bed Load Transportation and Bed Roughness» — U. S. Soil Conservation Service — Mars, 1953.
14) Kalinske — «Criteria for Determining Sand Transport by Surface — Creep and Saltation» — American Geophysical Union Trans. — Vol. 23, pt. 2, Nov. 43, p. 639.
15) Kaliske — «Experiments on Eddy — Diffusion and Suspended — Material Transportation in Open Channels» AGU Transactions. — Vol. 24, pt. 2, Jan. 1953, p. 530.
16) Labaye — «Note sur le Debit Solide des Cours d'Eau» — «La Houille Blanche». — N.º A, 1948.
17) Lacey — «A General Theory of Flow in Alluvium» — Journal of the Institution of Civil Engineers — November 1946.
18) Lane — «Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by ihe Bureau of Reclamation». — Proceedings A. S. C. E. — Vol. 70. Separata 280. Setembro de 1953.
19) Lane — «Suspended Load Control and the Problem of Channel Stabilizations». Proceedings of Hydraulics Conference — Bull. 20. Univ of Iwoa. Mars 1940, p. 193
20) Lane — Kalinske — «The Relation of Suspended to Bed Material in Rivers». Transactions of the American Geophysical Union — Reports and Papers Hydrology. 1939, p. 637.
21) Malhotra — «Effect of Barrages and Weirs on the Regime of Rivers» — AIRH, 1953.
22) Matrews - «Design of Stable Channels in a Coherent Alluvium» — AIRH, 1953.
23) Meyer peter and Müller — «Formulas for Bed Load Transport» — AIRTH, 1948.
24) Pardé — «Sur les Valeurs de la Turbidité Spécifique des Rivières» — «Deuxième Journée de l'Hydraulique» - Grenoble. 1952.

25) Nazir — Ahmed — «Lining of Channels: A Short Review on the Laboratory Tests Carried out on the Various Types of Lining Materials». —AIRTH, 1953.
26) Nisery — «Variation de la Granulometrie de Charriage dans une Section de Rivière» — AIRH, 1953.
27) Nizery — «La Station du Sautet pour l'Étude de Alluvionnement des Reservoirs» — «Deuxième Journées de L'Hydraulique» — Grenoble, 1952.
28) Nizery — «Note sur l'Entrainement des Matériaux par Charriage» — «La Houille Blanche», N.° A, 1949.
29) Pariset — «Investigation of the Silting-up and Desilting of Reservoir» — AIRH, 1953.
30) Raynaud — «Study of Saturated Rivers by Means of a Graphical Representation» — AIRH, 1953.
31) Rouse — «Engineering Hydraulics» — 1949.
33) Shielos — «Aplication of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed Load Mouvement» — Berlin, 1936.—Translated by the United Sthtes Dept of Agriculture — Soil Conserv. Service. California Institute of Technology — Pasadena — California.
34) Stevens — «The Silt Problem» — Trans. A. S. C. E. — 1936.
35) Tison — «Transport des Matériaux de Fond» — AIRTH, 1948.



BATERIAS

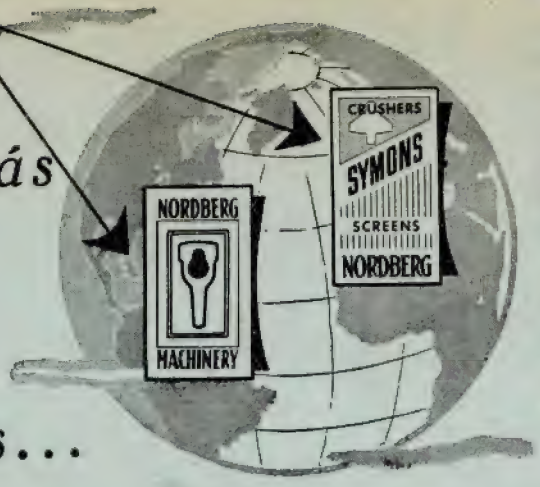
Tudor

PORTUGAL

PILHAS SECAS

• A MARCA MAIS ANTIGA •
• A MELHOR QUALIDADE •
• O MENOR CUSTO •

Por detrás destas marcas registadas...



A PRIMAZIA MUNDIAL

no domínio da preparação

DE MINERAIS E MINÉRIOS

Toda a capacidade industrial seria grandemente prejudicada se não fossem os vastos tratamentos de minérios e minerais em todas as partes do mundo. E sem maquinaria eficiente e de grande capacidade, os tratamentos de minérios e minerais não teriam o rendimento que lhes é possível hoje.

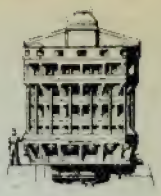
Neste campo importante, a Maquinaria Nordberg tornou-se a preferida dos grandes produtores do mundo inteiro... onde quer que minerais e minérios sejam tratados em quantidades.

Esta Maquinaria Nordberg de toda a confiança inclui guindastes para minas; Britadeiras Giratórias Symons para britagem primária; Britadeiras Standard e de cabeça curta, Symons, para britagem fina; Peneiras vibratórias e separadoras Symons; Moinhos a seco e molhado, e uma série muito completa de motores diesel Nordberg, que vão de 10 a mais de 10.000 C numa só unidade.

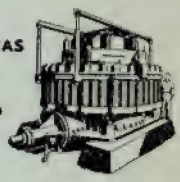
Peça folhetos sobre as máquinas que lhe interessam

SYMONS... MARCA REGISTADA NORDBERG,
CONHECIDA NO MUNDO INTEIRO

BRITADEIRAS GIRATÓRIAS SYMONS para BRITAGEM PRIMÁRIA nos tamanhos de 30" a 72" — Capacidade até 3500 toneladas por hora

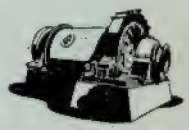


BRITADEIRAS CÓNICAS SYMONS para BRITAGEM FINA de 6 a 900 toneladas por hora



PENEIRAS VIBRATÓRIAS SYMONS para SEPARAÇÃO

SEPARADORAS VIBRÁTEIS SYMONS para todos os TRABALHOS em SÊCO E MOLHADO



MOINHOS NORDBERG numa VASTA SÉRIE de TIPOS E TAMANHOS

GUINDASTES NORDBERG PARA MINAS tanto para MINÉRIO como para MINEIROS

NORDBERG MFG. CO., Milwaukee, Wisconsin, U.S.A. END. TELEG. *NORDBERG*

LONDON
19 Curzon St., W.I.

JOHANNESBURG
42 Marshall Street

MEXICO, D.F.
Dolores 3

REPRESENTANTES NAS PRINCIPAIS ÁREAS COMERCIAIS DO MUNDO

XM-154-P

C. D. 536.7

FUNÇÕES TERMODINÂMICAS

PELO ENG.º QUÍM.-IND. (I. S. T) ANTÓNIO SALES LUÍS

I] Introdução

No estudo da termodinâmica é costume considerarem-se duas fases, a primeira das quais se estende a sistemas cujo estado fica definido por duas variáveis independentes:

— pressão e temperatura
— volume e temperatura
— volume e pressão

Numa segunda, consideram-se os sistemas definidos por $(n + 2)$ variáveis independentes. Essas variáveis são:

— a temperatura
— a pressão ou o volume
— n variáveis que se representam genèricamente por $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Sejam $X_1, X_2, \ldots, X_n$ as forças generalizadas correspondentes a essas variáveis. Como se sabe, a força generalizada X_k representa o trabalho realizado por unidade de variação, suposta fisicamente pequena, da coordenada generalizada correspondente x_k.

Assim, se todas as variáveis permanecerem constantes, com excepção de x_k, o trabalho elementar realizado é:

$$\partial \mathcal{Z} = X_k \, \partial x_k$$

Numa transformação em que todas as variáveis experimentem uma variação elementar, o trabalho total elementar realizado é:

$$\partial \mathcal{Z}_T = - p \, \partial v + \sum_k X_k \, \partial x_k \qquad \text{(I-1)}$$

Ao somatório que figura nesta expressão, dá-se o nome de trabalho útil e representa-se por $\partial \mathcal{Z}_u$:

$$\partial \mathcal{Z}_u = \Sigma X_k \, \partial x_k \qquad \text{(I-2)}$$

donde

$$\partial \mathcal{Z}_T = - p \, \partial v + \partial \mathcal{Z}_u \qquad \text{(I-3)}$$

Para tais sistemas, a expressão que traduz o 1.º princípio da termodinâmica (dispoitivo fechado [1]), escreve-se:

$$\begin{aligned} \partial U &= \partial Q + \partial \mathcal{Z}_T \\ &= \partial Q - p \, \partial v + \partial \mathcal{Z}_u \\ &= \partial Q - p \, \partial v + \sum_k X_k \, \partial x_k \qquad \text{(I-4)} \end{aligned}$$

Esta equação pode considerar-se como a equação de definição da função de estado energia interna (U). No que respeita à função de estado entalpia (H) que, no caso de sistemas a 2 variáveis é definida pela expressão:

$$H = U + p v$$

é costume, ao estudar sistemas a $(n + 2)$ variáveis, generalizar essa equação:

$$H' = U + p v - \sum_k X_k x_k$$

Neste estudo, faz-se corresponder, à função entalpia dos primeiros sistemas, duas funções de estado que se representam por H e H', se definem pelas equações:

$$H = U + p v \qquad \text{(I-5)}$$

$$H' = U + p v - \sum_k X_k x_k \qquad \text{(I-6)}$$

e se designam:

H ... entalpia
H' ... entalpia generalizada

Consequentemente, faz-se corresponder à função entalpia livre, dos primeiros sistemas, duas funções de estado que se representam por G e G', se definem pelas equações:

$$G = H - T S \qquad \text{(I-7)}$$

$$G' = H' - T S \qquad \text{(I-8)}$$

---

[1] Admite-se que o sistema evolue num dispositivo termodinâmico fechado no qual permanece.

e se designam:

G ... entalpia livre

G' ... entalpia livre generalizada

A função de estado energia livre F é definida do mesmo modo que para os sistemas a 2 variáveis:

$$F = U - TS \qquad \text{(I-9)}$$

II] Entalpia

Como vimos, a entalpia é a função de estado H definida pela equação:

$$H = U + pv \qquad \text{(II-1)}$$

Numa transformação elementar, a sua variação exprime-se pela relação:

$$\partial H = \partial U + p\,\partial v + v\,\partial p$$

ou, atendendo à expressão que traduz o 1.º princípio:

$$\partial U = \partial Q - p\,\partial v + \partial \mathcal{Z}_u \qquad \text{(II-2)}$$

vem:

$$\partial H = \partial Q + \partial \mathcal{Z}_u + v\,\partial p \qquad \text{(II-3)}$$

Se essa transformação for isobárica (p = constante), resulta:

$$\begin{aligned} \partial H &= \partial Q + \partial \mathcal{Z}_u \\ &= \partial Q + \sum_k X_k\,\partial x_k \end{aligned} \qquad \text{(II-4)}$$

Quer dizer, a variação da entalpia do sistema representa a totalidade da quantidade de calor e do trabalho útil, postos em jogo, numa transformação isobárica.

Numa transformação em que a pressão e todas as variáveis x_k se mantêm constantes, a equação (II-3), escreve-se:

$$\partial H = \partial Q \qquad \text{(II-5)}$$

A variação da entalpia do sistema representa, então, a quantidade de calor, posta em jogo, numa transformação em que se mantêm constantes a pressão e todas as variáveis x_k.

Por outro lado, se a transformação for isobárica e adiabática, a equação (II-3), escreve-se:

$$\partial H = \partial \mathcal{Z}_u \qquad \text{(II-6)}$$

A variação da entalpia do sistema representa o trabalho útil, posto em jogo, numa transformação isobárica e adiabática.

III] Entalpia Generalizada

Como vimos a entalpia generalizada é a função de estado H' definida pela equação:

$$H' = U + pv - \sum_k X_k x_k \qquad \text{(III-1)}$$

Numa transformação elementar, vem:

$$\partial H' = \partial U + p\,\partial v + v\,\partial p - \sum_k X_k\,\partial x_k - \sum_k x_k\,\partial X_k$$

ou, atendendo à expressão que traduz o 1.º princípio, resulta:

$$\partial H' = \partial Q + v\,\partial p - \sum_k x_k\,\partial X_k \qquad \text{(III-2)}$$

Então, se a transformação se realizar de modo que se mantenham constantes a pressão e todas as forças generalizadas X_k, equação (III-2), escreve-se:

$$\partial H' = \partial Q \qquad \text{(III-3)}$$

A variação da entalpia generalizada do sistema representa a quantidade de calor, posta em jogo, numa transformação em que se mantêm constantes a pressão e todas as forças generalizadas.

IV] Energia Livre

Como vimos, a energia livre F é a função de estado definida pela equação:

$$F = U - TS \qquad \text{(IV-1)}$$

Numa transformação elementar:

$$\partial F = \partial U - T\,\partial S - S\,\partial T$$

ou, atendendo à expressão que traduz o 1.º princípio da termodinâmica vem:

$$\partial F = \partial Q + \partial \mathcal{Z}_T - T\,\partial S - S\,\partial T \qquad \text{(IV-2)}$$

Como se sabe, a expressão que traduz o 2.º princípio da termodinâmica escreve-se:

$$T\,\partial S \geqslant \partial Q$$

verificando-se para as transformações reversíveis o sinal de igualdade. Então, a equação (IV-2) toma a forma

$$\partial F \leqslant \partial \mathcal{Z}_T - S\,\partial T \qquad \text{(IV-3)}$$

Desta equação (IV-3), conclui-se que:

1) para uma transformação reversível e isotérmica:

$$\partial F = \partial \mathcal{Z}_T$$
$$= - p \partial v + \sum_k X_k \partial x_k \qquad \text{(IV-4)}$$

A variação da energia livre do sistema representa o trabalho total, posto em jogo, numa transformação isotérmica e reversível.

2) para uma transformação isotérmica mas irreversível.

$$\partial F \leqslant \partial \mathcal{Z}_T \qquad \text{(IV-5)}$$

Então:

a) se o trabalho é realizado pelas forças exteriores:

$$\partial \mathcal{Z}_T > 0$$

donde

$$\partial F \leqslant \partial \mathcal{Z}_T$$

O aumento da energia livre do sistema é quando muito igual ao trabalho total recebido pelo sistema, numa transformacão isotérmica.

b) se o trabalho é fornecido pelo sistema:

$$\partial \mathcal{Z}_T < 0$$

é, por mais forte razão:

$$\partial F < 0$$

Há, portanto, diminuição da energia livre. Fazendo:

$$\partial \mathcal{Z}_T = - | \partial \mathcal{Z}_T |$$

vem

$$\partial F \leqslant - | \partial \mathcal{Z}_T |$$

ou

$$- \partial F \geqslant + | \partial \mathcal{Z}_T | \qquad \text{(IV-7)}$$

O trabalho total fornecido pelo sistema, numa transformação isotérmica, é quando muito igual à diminuição da energia livre do sistema.

V| Entalpia Livre

A entalpia livre é a função de estado definida pela equação:

$$G = H - T S \qquad \text{(V-1)}$$

Numa transformação elementar:

$$\partial G = \partial H - T \partial S - S \partial T$$
$$= \partial Q + v \partial p + \sum_k X_k \partial x_k - T \partial S - S \partial T$$

ou, atendendo à expressão que traduz o 2.º princípio, vem:

$$\partial G \leqslant v \partial p + \sum_k X_k \partial x_k - S \partial T \qquad \text{(V-2)}$$

em que, para as transformações reversíveis, se verifica o sinal de igualdade.

Desta equação (V-2) conclui-se que:

1) para uma transformação isotérmica—isobárica reversível:

$$\partial G = \sum_k X_k \partial x_k$$
$$= \partial \mathcal{Z}_u \qquad \text{(V-3)}$$

A variação da entalpia livre do sistema representa o trabalho útil, posto em jogo, numa transformação isotérmica — isobárica reversível.

2) para uma trnsformação isotérmica — isobárica mas irreversível

$$\partial G \leqslant \mathcal{Z}_u \qquad \text{(V-4)}$$

Tal como para a energia livre:

— o aumento da entalpia livre do sistema é quando muito igual ao trabalho útil realizado pelas forças exteriores.

— o trabalho útil fornecido pelo sistema é, quando muito, igual à diminuição da entalpia livre do sistema.

VI| Entalpia Livre generalizada

A entalpia livre generalizada é a função de estado G' definida pela equação:

$$G' = H' - T S \qquad \text{(VI-1)}$$

Numa transformação elementar:

$$\partial G' = \partial H' - T \partial S - S \partial T$$
$$= \partial Q - p \partial v + \sum_k X_k \partial x_k + p \partial v + v \partial p -$$
$$- \sum_k X \partial x_k - \sum x_k \partial X_k - T \partial S - S \partial T$$
$$= \partial Q - T \partial S + v \partial p - \sum_k x_k \partial X_k - S \partial T$$

ou, atendendo ao 2.º princípio da termodinâmica, vem:

$$\partial G' \leqslant v \partial p - \sum_k x_k \partial X_k - S \partial T \qquad \text{(VI-2)}$$

verificando-se, para as transformações reversíveis, o sinal de igualdade.

Para uma transformação isotérmica-isobásica:

$$\partial G' \leqslant -\sum_k x_k \partial X_k \qquad \text{(VI-3)}$$

ou, no caso desta ser reversível:

$$\partial G' = -\sum_k x_k \partial X_k \qquad \text{(VI-4)}$$

VII — Funções características

Como salientou Massieu, as propriedades termodinâmicas dum sistema ficam definidas e os seus valores determinados desde que se conheçam os valores:

— de todas as variáveis independentes
— e de uma função de estado.

A esta função de estado dá-se o nome de função característica, associada com esse conjunto de variáveis independentes. Como é obvio, para cada conjunto de variáves independentes, há uma função característica.

A expressão da variação elementar de cada uma das funções termodinâmicas, numa transformação elementar reversível, escreve-se, como vimos:

$$\partial U = -p\partial v + T\partial S + \sum_k X_k \partial x_k \qquad \text{(VII-1)}$$

$$\partial H = v\partial p + T\partial S + \sum_k X_k \partial x_k \qquad \text{(VII-2)}$$

$$\partial H' = v\partial p + T\partial S - \sum_k x_k \partial X_k \qquad \text{(VII-3)}$$

$$\partial F = -p\partial v - S\partial T + \sum_k X_k \partial x_k \qquad \text{(VII-4)}$$

$$\partial G = v\partial p - S\partial T + \sum_k X_k \partial x_k \qquad \text{(VII-5)}$$

$$\partial G' = v\partial p - S\partial T - \sum_k x_k \partial X_k \qquad \text{(VII-6)}$$

Destas expressões e das propriedades das diferenciais exactas, resulta [1] que as funções características, associadas com os diferentes conjuntos de variáveis independentes, são:

Variáveis Independentes	Função característica
v S x_k	U ... energia interna
p S x_k	H ... entalpia
p S X_k	H' ... entalpia generalizada
v T x_k	F ... energia livre
p T x_k	G ... entalpia livre
p T X_k	G' ... entalpia livre generalizada

A partir deste conhecimento, a escrita das equações (VII — 1) a (VII — 6) é imediata se admitirmos que a entropia é uma coordenada generalizada a que corresponde como força generalizada a temperatura. Na verdade, a análise dessas expressões mostra que:

1.º] na expressão da variação elementar duma função caracrerística, figuram as variações elementares das variáveis independentes correspondentes, multiplicadas por um coeficiente;

2.º] se a variável independente é uma coordenada generalizada (v, S ou x_k), o coeficiente é a força generalizada correspondente [1]

3.º] se a variável independente é uma força generalizada (p, T ou X_k), o coeficiente é a coordenada generalizada correspondente, considerada com sinal contrário.

A demonstração não é mais que uma simples aplicação das propriedades das diferenciais exactas. Como se sabe, [2] diz-se que um pfaffiano:

$$X_1\, dx_1 + X_2\, dx_2 + \dots X_n\, dx_n$$

é uma diferencial exacta quando existir uma variável V tal que a sua diferencial total dV é igual a essa expressão diferencial:

$$dV = X_1\, dx_1 + X_2\, dx_2 + \dots + X_n\, dx_n \qquad \text{(VII-7)}$$

---

(1) Mais adiante faz-se a demonstração para um caso; para os outros ela é absolutamente idêntica.

(1) A força generalizada correspondente ao volume é (— p), como resulta da expressão $\delta \tau = -p\,\delta v$.

(2) Cálculo diferencial e integral.

mas, por definição de diferencial total, é:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x_1} dx + \frac{\partial V}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} dx_n \qquad \text{(VII-8)}$$

Comparando as expressões (VII-7) e (VII-8), resulta [1]:

$$X_1 = \frac{\partial V}{\partial x_1}$$

$$X_2 = \frac{\partial V}{\partial x_2}$$

$$\dots\dots\dots\dots$$

$$X_n = \frac{\partial V}{\partial x_n}$$

Além disso, recorde-se ainda que a condição necessária e suficiente para que o pfaffiano:

$$X_1\, dx_1 + X_2\, dx_2 + \dots + X_n\, d_{x_n}$$

seja uma diferencial exacta é que as derivadas cruzadas sejam iguais:

$$\frac{\partial X_i}{\partial x_k} = \frac{\partial X_k}{\partial x_i}$$

Recordadas estas noções, a demonstração é imediata. Faz-se, apenas, para um dos casos, por exemplo para o caso de G. Pretende-se, então, demonstrar que, conhecido o valor das variáveis independentes:

$$p \quad T \quad x_k \qquad (k = 1, 2 \dots n)$$

e da função de estado G, pode-se determinar o valor das restantes propriedades, nomeadamente de:

$$v \quad X_k \quad U \quad S \quad H \quad H' \quad F \text{ e } G'$$

Na verdade, da expressão da variação elementar de G:

$$\partial G = v\, \partial p - S\, \partial T + \Sigma X_k\, \partial x_k$$

resulta:

$$v = \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{\substack{T \\ x_k}} \qquad \text{(VII-9)}$$

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{\substack{p \\ x_k}} \qquad \text{(VII-10)}$$

$$X_k = \left(\frac{\partial G}{\partial x_k}\right)_{\substack{p \\ T \\ x_\alpha}} \quad \alpha \neq k \qquad \text{VII-11}$$

Da definição da função entalpia livre:

$$G = H - TS$$

e da expressão (VII-10), vem:

$$H = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{\substack{p \\ x_k}} \qquad \text{(VII-12)}$$

o que permite determinar o valor da entalpia. Da definição da função entalpia:

$$H = U + p\,v$$

e das expressões (VII-9) e (VII-12), resulta:

$$U = H - p\,v$$

$$= G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{\substack{p \\ x_k}} - p\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{\substack{T \\ x_k}} \qquad \text{(VII-13)}$$

o que permite determinar o valor da energia interna. A determinação das restantes funções é feita a partir das respectivas equações de definição:

$$F = U - TS$$

$$H' = U + p\,v - \sum_k X_k\, x_k$$

$$G' = H' - TS$$

Note-se, no entanto, que o valor da entalpia livre pode ser determinado, por medidas calorimétricas, a menos de um termo aditivo da forma

$$a\,T - b$$

Na verdade, sendo (equação VII-12):

$$H = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{\substack{p \\ x_k}}$$

---

[1] Os coeficientes $X_1, X_2 \dots X_n$ representam as componentes do gradiante de V no espaço n — dimensional $(x_1\, x_2 \dots x_n)$.